

目錄

摘要.....	IV
一、前言.....	1
二、相關研究.....	2
2.1 粗糙節理面強度模式.....	2
2.2 不規則節理剪力行為之規模效應.....	2
2.3 節瘤尺寸之研究.....	3
2.4 傅立業級數於節理粗糙度之應用.....	4
三、研究方法.....	6
3.1 具不同等級節瘤節理面.....	6
3.1.1 二維節理剖面之選擇.....	6
3.1.2 三維節理表面選擇.....	6
3.1.3 節理面模型之製造.....	6
3.1.4 節理面試體準備.....	7
3.1.5 直剪試驗儀.....	7
3.1.6 試驗內容.....	7
3.2 具相同粗糙度之大小節理面.....	7
3.2.1 大小(粗糙程度)相仿節理面之產生.....	7
3.2.2 不同長度二維相仿剖面.....	8
3.2.3 不同直徑三維相仿節理面.....	8
四、試驗結果.....	10
4.1 節瘤等級問題之研究.....	10
4.1.1 二維剖面.....	10
4.1.2 三維節理面.....	11
4.2 節瘤規模問題之研究.....	13
4.2.1 二維剖面.....	13
4.2.2 三維節理面.....	13
五、結論.....	15
5.1 節瘤等級之研究.....	15
5.2 節瘤規模之研究.....	15
六、參考文獻.....	16

表目錄

表 1. 二維節理剖面之剪力強度及膨脹角試驗結果.....	18
表 2. 三維節理表面之剪力強度及膨脹角試驗結果.....	19

圖目錄

圖 1. 主要節瘤及次要節瘤之定義.....	20
圖 2. 改裝剖面儀切割珍珠板以製造二維節理剖面.....	20
圖 3. LOM 技術之層層套疊切割示意與 10cm 立體節理模型成品.....	21
圖 4. 受檢測的二維相仿節理面.....	22
圖 5. 具各級節瘤之三維節理表面.....	23
圖 6. 經自我相仿放大和等倍率放大之剖面線.....	23
圖 7. 長短相仿剖面高程曲線.....	24
圖 8. 珍珠版成型模具.....	24
圖 9. 粗糙度自我相仿的大小剖面.....	24
圖 10. 20cm 相仿放大的 LOM 立體節理模型成品.....	25
圖 11. 粗糙度自我相仿的大小矽膠模具.....	26
圖 12. 粗糙度自我相仿的大小石膏模型.....	26
圖 13. 剪動方向之定義.....	27
圖 14. 二維節理面 JRC 與取樣間距之變化.....	27
圖 15. 二維節理面節瘤坡角與取樣間距之變化.....	28
圖 16. 二維節理剖面在剪動後之破壞情形比較.....	29
圖 17. A 節理剖面之剪力行為【註：每一個應力環境下均有三個重複性試驗】.....	30
圖 18. B 節理剖面之剪力行為.....	31
圖 19. 節瘤膨脹角與正向應力之變化.....	32
圖 20. 三維節理面節瘤平均上坡角與基準面積之變化.....	33
圖 21. 三維節理表面膨脹角與正向應力之變化.....	34
圖 22. 低應力下($\sigma_n/JCS=1/140$), 40 階及 5 階節理面磨損位置之比較.....	35
圖 23. 高應力下($\sigma_n/JCS=1/20$), 40 階及 5 階節理面磨損位置之比較.....	36
圖 24. 40 階節理面磨損位置分佈圖.....	37
圖 25. 5 階節理面磨損位置分佈圖.....	38
圖 26. 粗糙度相仿、但不同長度剖面之節瘤破壞狀況比較.....	39
圖 27. 高低應力下, 大小試體之剪應力-剪應變與膨脹曲線比較.....	40
圖 29. 高低應力下、剖面剪動後 (10B) 之外觀破壞現象.....	41
圖 30. 剪動方向在平行葉理走向 (0° 剪動方向) 之磨損狀況.....	42
圖 31. 剪動方向在平行葉理走向 (270° 剪動方向) 之磨損狀況.....	43
圖 32. 大節理面 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 方向上磨損面積之發展($\sigma_n=0.490\text{MPa}$).....	45
圖 33. 大小節理之磨損面積比較.....	46
圖 34. 大小三維節理面之剪行為比較 ($0^\circ \rightarrow 180^\circ$).....	47
圖 35. 大小三維節理面之剪行為比較 ($270^\circ \rightarrow 90^\circ$).....	48
圖 36. 高低應力下大小三維節理面之剪行為比較($0^\circ \rightarrow 180^\circ$).....	49
圖 37. 高低應力下大小三維節理面之剪行為比較 ($270^\circ \rightarrow 90^\circ$).....	50
圖 38. 大小節理面於平行或垂直葉理方向上強度之比較.....	51

摘 要

岩石節理面力學行為之方向性與規模效應問題，主要導因於粗糙節瘤之作用。節瘤可細分成主要節瘤與次要節瘤：主要節瘤可以是節理剖面上之波浪狀大起伏，次要節瘤則是附加在主要節瘤上之小起伏或粗糙度。一般在低應力下由次要節瘤主控節理面之剪力行為，而在高應力下則由主要節瘤主控之，但明確的角色並不清楚。

本研究第一年首先以富立業級數觀念將 10cm 節理剖面分解以去除高階週期之次要節瘤，再組合成一個在外形上與原始剖面起伏相近之相仿剖面，利用直接剪力試驗方式，以探討主要與次要節瘤大小之角色。第二年依碎形理論中自我相仿轉換觀念，將節理面與節瘤放大，但卻保有原本的粗糙程度，用粗糙程度相近的兩種大小剖面探討節瘤在大小節理面上行為之差異。文中採用快速原型層狀成形法技術製作實物原型試體，以此自動化製作方式，可模擬各種由數學理論產生的節理面母模。

研究結果顯示：(1)在較高應力環境下，次要節瘤均會被剪斷，不影響膨脹效應，剪力膨脹效應與磨損行為可能是由主要節瘤坡角主控。(2)節瘤前後相對分佈位置自我相仿的長短剖面下，節瘤大小顆並不影響節理破壞形態。(3) 區別主要節瘤與次要節瘤之量測尺規約是試體長度之 $1/10$ 。(4)大試體要驅動所有大顆節瘤的阻抗強度或達到最大膨脹角均需較長的錯動才達尖峰強度狀態。(5)小節理面之磨損面積比例較多，可能是其強度比大節理面較高的原因。

Abstract

The anisotropy and scale effect on the shear behavior of rock joint is introduced by the joint asperity property. Asperity is categorized into first-order (primary) and second-order (secondary) categories. The behavior of rock joints is controlled primarily by the second-order asperity during small displacements and the first-order asperity governs the shearing behavior for large displacements. However, the role of these two asperities is not clear.

In this research, the Fourier series function is applied to resolve the original profile. Then, two model joints that consist of the first five and forty harmonics are tested to investigate the role of primary and secondary asperity in the shear behavior. According to the self-affine transformation law, we can not only generate the joint samples in different scales with the same roughness, but also with a similar looking profile. It will improve the investigation on the asperity size effect on the shear strength. The Laminated Object Manufacturing (LOM) technology to create the 3D surface geometry of joint model is also presented.

From the experimental observation, at very low stress levels the secondary asperity has a remarkable effect on the joint strength, but not on the dilation. The dilation behavior is mainly controlled by the large-scale primary asperity. To capture the geometric roughness effect of the secondary asperity, using a ruler scale less than 1/10th the joint length is necessary. The wear area during shearing is dominated by asperity the spatial distribution of asperities. The scale effect of joint shear strength is resulted from the different sheared areas in the small-sized and large-sized joint surfaces.

一、前言

岩石節理面力學行為之方向性與規模問題，主要導因於粗糙節瘤之作用，許多研究顯示粗糙程度與節理面之長度規模有關。而岩石節理面係由許多大小不等之起伏狀節瘤(asperity)組合而成，其高低起伏的程度對節理面之力學行為影響極大，尤其是在低應力環境下更顯著。節理面整體之粗糙度效應，係由前述大小尺度節瘤共同貢獻，節瘤可細分成主要節瘤與次要節瘤：主要節瘤可以是節理剖面上之波浪狀大起伏，次要節瘤則是附加在主要節瘤上之小起伏或粗糙度。一般在低應力下或較小岩坡滑移時，次要節瘤主控節理面之剪力行為；而在高應力下或較長滑移後，則由主要節瘤主控之。

本案為二年期研究，其研究目的主要有：

(1) 第一年首先以富立業級數觀念將 10cm 節理剖面分解成一系列正弦週期函數(第一階週期函數(剖面)具有最大尺寸之節瘤、而高階週期剖面則具極小尺寸節瘤)，再選取以前 5 階週期函數疊加，組合成一個在巨觀外形上與原始剖面起伏相近之相仿剖面，模擬只含主要節瘤之節理面(含二維剖面與三維節理面)，利用直接剪力試驗方式，以探討主要與次要節瘤大小之角色。

(2) 第二年依碎形理論中自我相仿轉換觀念，將 10cm 三維立體節理放大到 20cm 節理試體(在二維節理剖面是放大成 25cm 剖面、或縮小成 5cm 剖面)，但卻保有原本的粗糙程度，用粗糙程度相近的兩種大小剖面進行直接剪力試驗比較，以探討節瘤在大小節理面上行為之差異。

執行單位在這系列研究主題上，具體研究成果共計完成六個碩士論文[1,3,4-5,9,14]，並發表了四篇國內外期刊論文[11,27-29]與二篇國內外研討會論文[12,30]。本報告主要陳述具體發現之完整報告，以利讀者體會，細節可進一步參考本報告附錄之成果發表。

二、相關研究

2.1 粗糙節理面強度模式

眾多節理面強度模式中，實務上以 Barton(1973)[16]所提之剪力強度模式最廣為採用，除因為該模式係由大量實驗數據之迴歸所獲得的結果，尚因為它所包含的三個剪力強度參數極具工程意義，即弱面粗糙度係數(JRC)、弱面岩石壁材強度(JCS)、以及壁材組成岩石之基本摩擦角(ϕ_b)。Barton 以自然岩石節理面直接剪力試驗結果，迴歸出一經驗公式：

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ JRC \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b \right) \right\} \quad (1)$$

其中 JRC 為節理面粗糙度參數，可由比較 Barton 建議的 10 條標準剖面，其 JRC 介於 0~20。JCS 為節理壁面強度、 ϕ_b 為岩材基本摩擦角。其中，岩石基本摩擦角只與岩石組成礦物與顆粒大小有關，而與弱面之長短無關，因此不具規模效應問題。反觀其餘兩個剪力強度參數 JRC 與 JCS 均與弱面之長短有密切關係，通常越長的弱面越平滑其 JRC 值越低、壁材強度越弱其 JCS 值越小，因此弱面之 JRC 與 JCS 兩者均具有明顯的規模效應問題。本研究將根據此一公式之概念，視節理強度為 JRC、JCS、 ϕ_b 三者之集合效果以討論本試驗現象。

2.2 不規則節理剪力行為之規模效應

(1) Barton 與 Bandis 之研究

Bandis(1981)[15]承續 Barton[16]規模效應之研究，其研究方法為：以 11 組不同粗糙程度的自然節理面複製人工節理做為規模效應之研究；首先從 11 組節理中選一全尺寸的節理，再分割成三組大小不同尺寸的試體，於相同之正向應力下分別進行直接剪力試驗，試驗結果並指出其大小節理試體其剪力行為的差異性：當試體尺寸增加，則(i)尖峰剪位移逐漸增加；(ii)剪力破壞由脆性變成塑性；(iii)尖峰膨脹角減小；(iv)剪力強度減小；(v)剪力勁度減少。

對於 Bandis 僅在單一應力階來探討節理剪力行為，不過他相信這些現象已足夠來包含節理面之剪力行為規模效應。由此可知，對於在不同應力階環境節理剪力行為(包括剪力強度、尖峰剪位移、膨脹角、JRC)僅著重尺寸長度的影響。並沒有做進一步的分析與探討。Bandis 認為影響 JCS 的規模效應可反應於節理磨損角分量 S_A (asperity failure component)。 S_A 可表示為一角度的物理量，其建議公式為：

$$S_A = \phi_p - (\phi_b + d_n) \quad (2)$$

其中： S_A 為節理磨損角、 ϕ_p 為尖峰膨脹角、 d_n 為尖峰膨脹角。實驗結果

顯示了：節理尺寸愈長與正向力愈大，則 S_A 影響程度就愈小，且 S_A 值隨著磨損程度增加而減小，此即顯示了不同尺寸及正向應力時，JRC 及 JCS 對於剪力強度的貢獻度。至於他所建議 JCS 規模效應公式，係以不同尺寸節理進行直剪試驗，再由尖峰磨擦角反求各尺寸節理之節理磨損分量 S_A 。並以最小尺寸節理($L=5\text{cm}$)之單壓強度($JCS=2\text{MPa}$)為基準，再以各尺寸節理之 S_A 與最小尺寸試體之 S_A 折減比例來換算得各尺寸節理之 JCS；再將 JCS 代入 Barton 強度模式反算出 JRC 值。最後將 JCS、JRC 以最小長度(L_0)關係無因次化迴歸，得知 JCS_n 與 JRC_n 之規模效應公式。Barton&Bandis[17]建議式如下：

$$JRC_n = JRC_o \times \left[\frac{L_n}{L_o} \right]^{-0.02 JRC_o} \quad (3)$$

$$JCS_n = JCS_o \times \left[\frac{L_n}{L_o} \right]^{-0.03 JRC_o} \quad (4)$$

上述公式意義是 JRC 與 JCS 兩者均隨現地弱面長度(L_n)之增加而呈冪次方關係遞減，並與室內弱面(尺寸 L_o)之原始粗糙程度(JRC_o)有關；而且 JCS 隨尺寸之遞減效應較 JRC 更為明顯。但上列兩式，是由弱面直接剪力試驗之強度透過 Barton 剪力強度模式反推 JCS 值，而與弱面長度尺寸建立關係。然而上述研究方式是在同一塊自然弱面上截取大小不等的弱面試體，分別進行試驗，但該大小弱面試體間並不易具有相同的粗糙度 JRC 值。故在探討大小弱面剪力強度的試驗結果中，每一試體之強度仍同時受 JRC 與 JCS 兩變數之干擾，故而上述 JCS 公式中除了長度尺寸因素外仍可見到 JRC 之影響，並無法將 JRC 與 JCS 兩者之規模效應單獨分開討論，因之長短弱面中 JRC 與 JCS 之折減行為並不易理解。本文則根據自我相仿理論的觀念恰可仿製尺寸不同、但粗糙程度相近之大小節理試體，因此可探討粗糙程度不變下大小節理被放大或縮小後之剪力行為差異。

(2) 李宗德之研究

李宗德(1983)[2]亦以Barton提出之節理標準JRC剖面進行類似的規模效應研究；其選取Barton標準剖面粗糙度係數為2-4、10-12、18-20放大成30cm剖面，再將之截切成兩段15公分或三段10公分或四段7.5公分的剖面，共備有四種尺寸不等之試體，並分別以厚2公釐鋁片沿剖面外形敲製二維節理模具，再利用石膏灌鑄人工節理試體俾進行一系列直接剪力試驗，亦與Bandis[15]類似的規模效應結論。並以Tse-Crudan[25]的方法量測每一段節理的粗糙係數，結果顯示對同一條剖面而言不同區域之粗糙度並不相同。

2.3 節理尺寸之研究

一般而言，自然岩坡多處於低正向應力之環境中，微起伏之次要節理將充分發揮抗剪作用；然而，在壩翼受力區中，所承受之正向應力及剪應力相當大，且

剪位移亦相當大，微起伏之次要節瘤將會被剪斷，僅有大起伏之主要節瘤尚能發揮抗剪作用。故對於工程設計，端視工程問題係處於何種應力環境，予以採取合適之節瘤粗糙角，岩坡問題將採用次要節瘤之粗糙角；壩翼受力區則採用主要節瘤之粗糙角。

(1) Rengers (1970) 使用基線長尺規沿著節理剖面線量測粗糙角，其基線長度與節理面之平均面會有交角，若變化量測之基線長度，將會得到一系列之粗糙角，並繪出隨基線長度變化之粗糙角，當基線長度甚小時，將會得到最大粗糙角；當基線長度大出節瘤波長甚多時，其最大粗糙角將趨近於零。因此節瘤之幾何角度是隨量測尺規在改變的。

(2) Patton (1966) [22] 以上坡角來描述規則節理面之粗糙度，節瘤之尺度大者可至數公尺，小者可至數公厘。而粗糙度規模大者，稱為大起伏 (waviness)，亦稱為主要節瘤 (primary asperity) 或一階 (first order) 節瘤；規模小 (數公厘) 至中等 (數公分) 者，稱為微起伏 (unevenness)，亦稱為次要節瘤 (secondary asperity) 或二階 (second order) 節瘤，如圖 1 所示：

圖 1 顯示：兩顆大起伏之主要節瘤，其平均粗糙角分別為 13° 及 16° ，其粗糙角可於現場選用合適之尺規，置於節理面內壁之岩石面上，沿著平行節理面滑動方向，量測節瘤之平均波長 (wave length) 及最大波幅 (amplitude)，再間接計算主要節瘤之粗糙角。圖 1 顯示：在大起伏之主要節瘤上佈滿了許多微起伏之次要節瘤，其平均粗糙角則為 $10^\circ \sim 46^\circ$ ，由主要節瘤及次要節瘤之示意圖可得知次要節瘤之粗糙角通常大於次要節瘤。

(3) Singh & Goel (1999) [24] 提出在 Barton-Bandis 節理模式中，岩石自然節理之尖峰摩擦角除了包括基本摩擦角及膨脹角以外，將導入主要節瘤之粗糙角，如下式所示：

$$\phi_j = \phi_r + i + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) < 70^\circ \quad (5)$$

其中 ϕ_r 為殘餘摩擦角； i 係指主要節瘤之粗糙角，一般而言，其值通常小於 6° ；JRC 係指次要節瘤之粗糙度係數。

(4) ISRM (Brown, 1981 [18]) 建議取 $\Delta x = 0.02L$ (L = 節理面長度) 為量測節理剖面之間距，若節理面長度為 10cm，其 $\Delta x = 0.2cm$ ，則節理面有 50 點高程數據點，由這 50 個數據點來反應不同尺寸之節瘤傾斜角顯現之差異。

2.4 傅立業級數於節理粗糙度之應用

傅立業轉換在分析金屬表面幾何性質上已有相當廣泛之使用，亦可應用於岩石節理面之模擬，利用傅立業各種展開方式來表示節理剖面的起伏程度。傅立業級數 (Fourier series) 是包含正弦函數與餘弦函數的級數，可由數個具有週期性之不同函數疊加而成，然而，在工程應用上，在有限長度內節理剖面應不具週期性，故須將節理面總長度視為一個週期，它是求解常微分與偏微分方程式的重要工具，並可用來模擬任意數學函數的軌跡。

(1) Raja 等人 (1977) [23] 利用有限項數之傅立業級數來模擬一般岩石節理不

規則剖面，即將不規則剖面表示為一系列振幅與週期不同之正弦函數或餘弦函數之疊加。其研究結果顯示決定疊加項數需考慮均方差及累積振幅百分比兩項因素，當原始剖面形狀粗糙度愈大，而疊加項數愈多時，則模擬效果較好。

(2)張文城(1988)[8]利用傅立業級數將不規則節理面展開成規則節理面之組合，且建議最佳展開之項數為 20 項。在連續性問題方面，因原始剖面屬於非週期性函數，故經由傅立業級數展開後，於剖面兩端點處會造成與原始剖面之傾斜角不相同，故建議在原始剖面之兩端點最好位於同一參考面，否則在傅立業級數模擬剖面線兩端點之傾斜角應加以濾除。

(3)楊偉成(1998)[13]利用傅立業級數將節理面以一系列規則之正弦型諧和剖面來模擬不規則節理面，其結果顯示：前 5 項傅立業級數之疊加已可充分反應主要節瘤之幾何特徵；若疊加至 20 項則可模擬主要節瘤上之次要節瘤之幾何特徵。

傅立業級數(Fourier series)是包含正弦函數與餘弦函數的級數，是求解常微分與偏微分方程式的重要工具，並可用來模擬任意數學函數的軌跡，假設有一長度為 L 之節理剖面，可利用傅立業各種展開方式來表示節理剖面的起伏程度，以下為傅立業級數的基本觀念及正弦與餘弦函數之間的轉換關係。

假設隨機週期函數 $f(x)$ ，其週期為 L ，即 $f(x+L)=f(x)$ ，則 $f(x)$ 可以傅立業級數表示如式(6)所示：

$$f(x) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[G_n \cdot \cos\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) + H_n \cdot \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) \right] \quad (6)$$

其係數可經由 $f(x)$ 與尤拉公式求得，如式(6.a~6.c)所示：

$$G_0 = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \int_0^L f(x) dx \quad (6.a)$$

$$G_n = \left(\frac{2}{L}\right) \cdot \int_0^L f(x) \cos\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) dx \quad (6.b)$$

$$H_n = \left(\frac{2}{L}\right) \cdot \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) dx \quad (6.c)$$

而式中 G_0 為反應函數 $f(x)$ 所對應之平均線，即為與 x 軸平行且垂直 y 軸的截距。

三、研究方法

3.1 具不同等級節瘤節理面

3.1.1 二維節理剖面之選擇

本研究之二維剖面有三種來源：JRC 標準剖面、取自片岩、或以碎形理論模式產生。例如，以等間距為 0.1cm 將 Barton 之 JRC=14-16 標準剖面[15]及截取片岩三維節理表面中央之一條二維節理剖面分別分割為 100 等分，故有 101 個數據點。最後則利用傅立葉級數觀念將此剖面分解成一系列之正弦函數及餘弦函數，並選取前 5 階之週期函數組合成二維節理剖面。其中，前 5 階剖面具有較大尺度與高程之主要節瘤；原剖面(或以前 40 階週期函數組合)則由主要與次要節瘤疊加組合而成[9,14]，乃具有極小尺度與低矮之次要節瘤。

3.1.2 三維節理表面選擇

三維節理表面則取圓形黑雲母片岩、砂岩節理面上 100 條高程剖面（單一方向），利用傅立葉級數觀念將 100 條剖面分解成一系列之正弦函數及餘弦函數[3,9]，選取前 5 階之週期函數組合成三維節理面，節理面之直徑皆為 10cm。

3.1.3 節理面模型之製造

(1) 二維節理剖面

本文以線切割概念利用珍珠板為剖面切割材，以粗糙度剖面儀之自動化步進馬達控制系統，預設移動軌跡(節理剖面高程資料)，使掃描平台移動時與被鉛直固定於機台的電熱絲產生相對位移，達到切割珍珠板產生節理剖面目的(參見圖 2(a)~(c))。再以矽膠 RTV-533 翻製矽膠模具，圖 2(d)，其次以矽膠模具翻製石膏試體。

(2) 三維立體節理表面

本文採用快速原型 RP (Rapid Prototyping) 的層狀成形法 (LOM, Laminated Object Manufacturing) 技術製作之試體[3,9,30]，其製造之原理(參見圖 3)為利用層疊加工(Additive Process)方式，依據 CAD 模型製造實物原型；依一層疊固定厚度之紙張與一立體的實體相切，立體模型經由分層處理後能自動產生每一截面二維的幾何圖形點資料，所得為數層的平行輪廓曲線，電腦即讀取此分層之輪廓線，以切層方法，利用雷射光束打在目標平面紙上，切割出一層層幾何薄片形狀；於製作完成後以手工將輪廓線外之廢料剝除，即得到與原先之立體實體相同之複製品即為本文所使用之 RP 模型(參見圖 3)。然後，在完成之實體模型表面噴一薄層的脫模劑（矽油），並以矽膠（型號為 RTV-533）翻製矽膠試體，再以此矽膠母模翻製直剪試驗所需之石膏試體。

本文模型係委託台大機械精密加工室製作，將所選定之剖面高程數值資料之電腦檔案經由 Master CAM 處理，鋪成三維之立體模型，再將資料匯至 LOM 系統之

電腦中，產生雷射切割的路徑資料檔案。電腦輔助製造機具為 HELISYS 公司生產之 LOMIOI5-PLUS 系統 LOM 機器，模型材料為紙背附有薄層熱熔黏膠之特殊紙張，其厚度為 $0.1075 \pm 0.0005 \text{ mm}$ 。

3.1.4 節理面試體準備

每種試體製作過程幾乎相同，只是模具剖面形狀不同，為達到節理剖面完全密合，首先需先利用矽膠模具灌製下盤試體，養護此下盤試體，待其含水量穩定後；其次以此下盤試體為模具，表面塗抹脫模之凡士林，灌製出上盤試體，如此即可確保試體節理面完全密合；最後再將上、下盤試體置於 40°C 之烘箱養護至含水量達穩定後，即可取出進行直接剪力試驗。

3.1.5 直剪試驗儀

剪力系統係利用空壓機之氣壓帶動油壓機之油壓系統，剪動油壓缸可做反覆式推拉前進或後退移動。正向應力施加方式採兩段式雙槓桿定平系統來施加呆重。於試驗過程中，當達尖峰剪力強度值時即停止試驗。

3.1.6 試驗內容

本文採用兩組(A、B 組)10 cm 之二維節理面，參見圖 4，每組剖面又分有主要節瘤及次要節瘤兩種剖面(編號 2P05A、2P05B、2P40A、2P40B)，另六組(C~H 組)只做粗糙度分析用；一組直徑 10cm 之三維節理面(3P05A、3P40A)進行剪力試驗，每種剖面施加數種正應力，參見圖 5，另一組砂岩三維節理面(3P05B、3P40B)只做表面粗糙度分析用。

3.2 具相同粗糙度之大小節理面

3.2.1 大小(粗糙程度)相仿節理面之產生

(1) 二維剖面(單變數碎形布朗運動)

自然節理面粗糙幾何應是屬於自我相仿的形式，根據碎形布朗運動(Fractal Brownian motion)[20] 的特性，若一函數符合碎形布朗運動的特性需滿足：(i)隨機函數路徑(節理剖面高程)滿足高斯分佈過程，且增量相互間不具獨立性，函數值受前後增量歷史的影響，具有記憶特性；(ii)原剖面圖形合乎連續且不可微分；(iii)原剖面圖形滿足自我相仿 (self-affine)，如式 (7) 所示：

$$y(x + \Delta x) - y(x) \cong \frac{y(x + r\Delta x) - y(x)}{r^H} \quad (7)$$

其中，H 為 Hurst 指數[19,31]； r 則為任意大於零之實數，H 值可根據上式關係經由試誤法求得，Hurst 指數可用來表示運動軌跡的跳動程度或粗糙程度，其特性為，符合碎形布朗運動的函數路徑關係，每一時刻的函數均受到前後運動歷史的影響，具有記憶性。而 Hurst 指數值為 $0 < H < 1$ ，H 值愈大表示節理面粗糙度愈小，而 H 值愈小粗糙程度愈大。Hurst 指數趨近於 0 時，圖形將劇烈跳動，反之，

當 Hurst 指數接近於 1 時，圖形將趨於緩和，故 H 值可用以表示一節理面粗糙度之特性。

即若將節理面粗糙幾何 x 軸任意轉變為 r 倍，高程函數值 y 經指數型式轉換成 r^H 倍做非等向性轉換 (affine transformation)，如此經縮小或放大 r 倍後之剖面仍與原型方能維持統計上的相似性。故欲使一個自我相仿之節理面碎形曲線縮放後維持相同的粗糙程度，縮放時必須遵守自我相仿的轉換觀念，即使節理剖面沿著 x 軸放大 r 倍時，而同時沿著 y 軸須放大 r^H 倍，對於原始剖面與放大後之剖面而言，這兩個剖面外形上之粗糙程度將不會有明顯不同 [7,10,21,26]，參見圖 6。

根據碎形理論中自我相仿的觀念，可將弱面不規則的高程與長度間做不等倍率的相仿放大轉換，可使放大後的弱面仍可具有與原始小弱面的粗糙程度接近。本文先採用隨機中點位移法產生碎形維度 1.1、1.15 兩種剖面(A、B 組)，再以原始產生之 512 點數據作為長度 10cm 的基準剖面數據，再對此剖面分別進行自我相仿縮放 0.5 及 2 倍，即每一種粗糙度(A、B 組)之剖面分別轉換得三個不同尺寸(5、10、25cm)之剖面 (見圖 7)，並先切割珍珠板長節理剖面模型(見圖 8)再灌鑄石膏試體(見圖 9)以供試驗。

(2) 三維節理面(? 變數碎形布朗運動)

事實上，因為自然節理的地形是一個三維的幾何，因此雙變數碎形布朗運動將可使用於描述節理表面的高程分佈，而這些隨機變數的高程分佈可視作一個碎形布朗運動的高程。三維節理面之粗糙幾何是一個含參數 H 的雙變數碎形布朗運動[27-28]，高斯隨機過程 $y(x, z)$ 須滿足： $y(0,0)=0$ 且 $y(x, z)$ 是連續函數；其凹凸不平之高度增量為： $\Delta y = y(x + \Delta x, z + \Delta z) - y(x, z)$ ，其為常態分佈且高度平均值為零： $\mu = 0$ ，變異數為： $\sigma^2(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2})^{2H}$ ，其中之標準偏差 σ 為正值。因此一個節理表面之碎形布朗運動性質須滿足如式 (8) 所示之關係式：

$$y(x + \Delta x, z + \Delta z) - y(x, z) \cong \frac{1}{r^H} [y(x + r\Delta x, z + r\Delta z) - y(x, z)] \quad (8)$$

其中，縮放比 r 是一個實數，其意義為節理表面於 x 方向與 z 方向放大 r 倍時，高度 $y(x, z)$ 則放大 r^H 倍，則其仍滿足自我相仿的特性。

本文大小三維節理表面係使用之第一年研究中所提之直徑 10cm 片岩節理試體(S10 型、 $H=0.8104$ [5,27])，經自我相仿轉換放大後(即 x 放大 2 倍、y 放大 $2^{0.8104}$ 倍)得到另一直徑 20cm 相仿節理面，以 LOM 技術製作 RP 模具試體 (H20 型，見圖 10)，再以此 RP 模型翻製矽膠母模(見圖 11)，用以重複灌鑄石膏模型節理試體(見圖 12)。

3.2.2 不同長度二維相仿剖面

本文採用的模具分為兩種粗糙度，分別為以隨機中點位移法所產生 A 組剖面(JRC=8) 有三種尺寸(參見圖 7 及圖 9)：5cm×5cm [編號 5A]、10cm×10cm [編號 10A]及 25cm×10cm [編號 25A]。及 B 組剖面(JRC=12)有三種尺寸：5cm×5cm [編號 5B]、10cm×10cm [編號 10B]及 25cm×10cm [編號 25B]等六種。每種剖面施加數種正向應力($\sigma_n/JCS=1/100 \sim 1/7$)，共 81 組實驗[4]。

3.2.3 不同直徑三維相仿節理面

本文所使用之小節理面如圖 12 所示為直徑 10 公分之試體 (S10 型) 及前述

大節理面 20 公分試體 (H20 型)。兩種節理面分平行葉理($0^{\circ}-180^{\circ}$)和垂直葉理($270^{\circ}-90^{\circ}$)兩個方向剪動(參見圖 13 定義之剪動方向)。且於每個方向分別施加 3 種正向應力 ($\sigma_n=0.098$ 、 0.294 、及 0.490MPa)，共計 36 組實驗[9]。

四、試驗結果

4.1 節瘤等級問題之研究

4.1.1 二維剖面

(1) 量測尺規對 JRC 之影響

本文依據雷射剖面儀以不等取樣間距量測 A、B 兩組四條剖面所得之數據(見圖 4)，以 Tse-Crudén 公式 ($\Delta x = 0.10\text{cm}$) 計算節理面之粗糙度 JRC 值，結果如圖 14 (a)(b)所示：兩相仿剖面 JRC 均隨著取樣間距之增加而遞減，均呈現尺規效應。5 階節理剖面(主要含主要節瘤)的 JRC 值，隨著取樣間距增加而遞減之趨勢較不顯著，顯示主要節瘤較不受尺規之影響，亦即以 JRC 為參數較無法反映主要節瘤之影響；而 40 階節理剖面(同時含主要節瘤與次要節瘤)的 JRC 值，隨著取樣間距之增加而遞減之趨勢則相當顯著，顯示對粗糙度較高之節理面 JRC 值具有較明顯之尺規效應。(註：本報告僅擇要陳述具體發現，以利讀者體會，細節可參考文後所列參考文獻論文)

當 2P05A 及 2P40A 節理剖面之取樣間距為 0.7 cm 時、而 2P05B 及 2P40B 取樣間距為 0.85 cm 時，40 階及 5 階剖面之 JRC 幾乎相等，故以太大的尺規量測兩者所判定的粗糙程度並沒差別。

(2) 量測尺規對節瘤坡角之影響

進一步，本研究以圖 4 八組相仿剖面(共十六條剖面，長度有 10、15、25cm 三種)為對象，探討量測尺規對平均上坡角之影響，結果如圖 15。顯示：40 階及 5 階兩相仿剖面之節瘤上坡角(屬於幾何粗糙角)均隨取樣間距之增大而遞減，現象與前述 JRC 一樣具有尺規效應，愈粗糙的節理愈明顯。例如：圖 15(a) A 組剖面(2P05A 及 2P40A 節理)之取樣間距 $\Delta x \geq 0.80\text{cm}$ 時，兩者之節瘤上坡角 i 趨於一致 ($i=13.49^\circ$)、由圖 15(b) 之 2P05B 及 2P40B 節理之取樣間距 $\Delta x \geq 1.00\text{cm}$ 時，兩者之節瘤上坡角亦趨於一致 ($i=5.68^\circ$)。即 40 階與 5 階剖面兩相仿剖面之取樣間距太大到 $\Delta x/L \geq 1/10$ 時，將會忽略次要節瘤的存在無法反映次要節瘤所造成的差異，兩者巨觀上之起伏程度相似。

因此，量測尺規愈長，易忽略次要節瘤，則節瘤上坡角愈小，故當量測尺規大到使兩剖面之上坡角相等時，所反應出來之上坡角主要來自主要節瘤。以此觀念可用以區別主要節瘤與次要節瘤之尺寸，本文經檢核 8 組節理剖面之起伏，區別主要節瘤與次要節瘤之量測尺規約是試體長度之 1/10。

(3) 應力環境對剪力行為之影響

(a) 低應力環境之破壞型態

對 A、B 節理面而言，如圖 16(a)及圖 16(c)所示，於低應力環境下 ($\sigma_n/JCS \geq 1/140$)，5 階節理剖面之節瘤幾乎不受損傷，而 40 階節理剖面之節瘤僅輕微磨損，仍保有 5 階節理面巨觀之幾何形態。但如圖 17(a)、圖 18(a)所示，

40 階節理面之剪力強度較 5 階節理面大，即節瘤上坡角愈大，則節理面之剪力強度愈大，故尖峰剪力強度主要是由其粗糙度所提供。

(b) 高應力環境之破壞型態

當應力環境由 $\sigma_n / JCS \geq 1/140$ 增加至 $\sigma_n / JCS \geq 1/20$ 時，如圖 16(b)及圖 16(d)所示，40 階節理面之主要節瘤上坡面之次要節瘤嚴重被剪斷(但其破壞位置與低應力相同，皆發生於高角度之節瘤)。在高應力環境下，疊加於主要節瘤上之次要節瘤會先受到磨損，其次再發生於主要節瘤。破壞皆集中於某些特定節瘤上，隨著應力環境之增大將使磨損面積亦隨之增加。

(4)應力環境對膨脹角之影響

由直接剪力試驗(資料詳見表 1)得知，40 階及 5 階剖面之膨脹角(屬於力學粗糙角)將隨正向應力之增加而遞減，直至兩者相等，如圖 19 所示，2P05A 與 2P40A 剖面及 2P05B 與 2P40B 兩種剖面皆在 $\sigma_n / JCS \geq 1/20$ 時，40 階及 5 階剖面之膨脹角將會相當近似。亦即當 $\sigma_n / JCS \geq 1/20$ 時，次要節瘤均會被剪斷忽略，不影響 5 階及 40 階膨脹效應之差別，此時節理剪力強度將由主要節瘤所主控。

若與前述幾何粗糙角 i 比較顯示：在低正向應力下，2P40A 剖面之膨脹角只有 19.27° 遠小於前述其幾何粗糙角 27.38° ，但與 2P05A 剖面之幾何粗糙角 14.79° 極為接近；而 2P40B 剖面之膨脹角也只有 19.45° 遠小於其幾何粗糙角 39.01° ，亦與 2P05B 剖面之幾何粗糙角 16.20° 極為接近。因此，本文判斷剪力膨脹效應可能是由主要節瘤坡角所主控，次要節瘤極易因剪動而被刮去，故無法支撐試體之爬升膨脹。

4.1.2 三維節理面

(1) 量測尺規對平均粗糙角之影響

本文嘗試利用如圖 5(a)及圖 5(b)所示的片岩(3P05A 與 3P40A)及砂岩(3P05B 與 3P40B)節理面為例，共計兩組相仿節理面(4 個節理表面)。3P40A 節理面除了具有 3P05A 節理面之主要節瘤外，尚有細小之次要節瘤疊加於主要節瘤上，巨觀幾何形態與 3P05A 節理面極為類似；3P05B 節理面中央有一明顯落差，其餘節瘤起伏較小，而 3P40B 節理面與 3P40A 節理面均有細小之次要節瘤疊加於主要節瘤上，因此，40 階節理面之粗糙度較 5 階大。

本文分別變化量測尺規大小(其基底形狀為正方形)，以探討三維節理面節瘤平均上坡角與量測尺規之關係。藉由分析片岩及砂岩四個方向在不同矩形元素所得之節瘤平均上坡角，可得知節瘤平均上坡角與量測尺規之變化關係(如圖 20 所示)，如下所述：

片岩：就整體而言，隨量測尺規增大仍有降低之趨勢。在 0° 方位之量測尺規為 1.0cm 時， 180° 方位之量測尺規為 0.9cm 時、 270° 方位之量測尺規為 0.6cm 時，3P40A 及 3P05A 節理面之節瘤平均上坡角幾乎相等。砂岩：在 180° 方位之量測尺規為 1.1cm 時、 270° 方位之量測尺規為 0.9cm 時，3P05B 及 3P40B 節理面之節瘤平均上坡角也幾乎相等。

故當矩形元素之邊長小於節理試體直徑之 $1/10$ ，40 階及 5 階節理之平均上坡角將不會隨著基準面積之增加而改變，意指在此情況下主要節瘤及次要節瘤間並無尺規效應，表示該尺規已足夠反應節理面整體之粗糙特徵。量測尺規大於節理試體直徑之 $1/10$ ，40 階及 5 階節理之平均上坡角幾乎相同，此時次要節瘤之效應將會被忽略，即整個節理面之平均坡角將由主要節瘤來決定。

另一方面，由直接剪力試驗得知，40 階及 5 階剖面之膨脹角（見圖 21 或表 2）將隨正向應力之增加而遞減，直至 $\sigma_n / JCS \geq 1/20$ 兩者相等，亦即此時次要節瘤不影響 5 階及 40 階膨脹效應之差別，節理剪力強度將由主要節瘤所主控。

(2) 三維節理面磨損區之探討

節瘤磨損形狀受剪動方向相對於節理面葉理方向之影響，本節將針對 40 階及 5 階節理面對磨損形狀及位置之角色，詳述如下（參見圖 22～圖 25）。

(a) 剪動方向與葉理方向平行：

(i) 對 40 階節理面在 0° 及 180° 方向之剪動（與葉理走向平行），隨著正向應力之增加，其磨損形狀由小斑點狀散佈於高角度之節理面上，並逐漸沿著剪動方向上（葉理方向）擴大。就整個節理面而言，磨損位置幾乎位於高角度之主要節瘤上，其分佈範圍較分散；且磨損形狀開始時為近似圓形，後來逐漸轉為橢圓形，長軸與葉理同向。

(ii) 5 階節理面之磨損位置，亦主要集中於某幾顆較高角度之主要節瘤上，但因其節瘤角度較 40 階節理面低，故 5 階節理面之磨損範圍有明顯集中之現象，但磨損形狀亦與 40 階節理面頗為近似。

(b) 剪動方向與葉理方向垂直：

(i) 40 階節理面在 90° 及 270° 方向之剪動（與葉理走向垂直），隨著剪應力之增加，磨損形狀亦由小斑點狀散佈於高角度之節瘤上，並逐漸沿著葉理方向擴大，且磨損形狀較近似長條形而非圓形。就整個節理面而言，其磨損位置較 0° 及 180° 時更為分散散佈於整個節理面上，並非僅侷限於某幾顆高角度之節瘤。

(ii) 5 階節理面之磨損位置與 40 階節理面相同，亦分散於整個節理面上，且磨損形狀亦與 40 階節理面頗為雷同，近似於長條狀。

綜上所述，由試驗結果顯示：三維節理面之磨損位置係發生於主要節瘤高角度之上坡面處。40 階節理面之磨損位置乃為 5 階節理面之高角度主要節瘤，即是三維節理面之磨損行為乃由主要節瘤所控制。當剪動方向與葉理走向平行時，節理面之磨損形狀皆近似於圓形或橢圓形；剪動方向與葉理走向垂直時，磨損形狀皆近似於長條形。40 階節理面於低正向應力下，除了次要節瘤遭受剪斷外，尚有主要節瘤繼續抵抗外力，故尖峰剪力強度較大；直至過了尖峰剪力階段，該主要節瘤亦遭到剪斷刮除，則與 5 階節理面（僅含主要節瘤）之磨損情形一致。

4.2 節瘤規模問題之研究

4.2.1 二維剖面

(1)破壞外觀

本文共採用了 3 種尺寸(5cm、10cm 及 25cm) A 型及 B 型剖面，分別觀察於試驗過程中試體之外觀破壞現象，其照片如圖 26 所示。雖試體及節瘤尺寸不同，但其節瘤分佈幾何特徵上對應位置均相似，故其破壞發生之位置均發生於某些特定節瘤上。顯示經自我相仿轉換後的長短剖面幾何性質確實是相似的，在節瘤前後相對分佈位置固定條件下，節瘤大小顆並不影響節理破壞形態。

(2)強度規模效應

不論對 A 型或 B 型剖面，於相同正向應力作用下，可發現剖面尺寸越短或節瘤規則愈小其強度越高(如圖 27 所示)：即試體 5A(5cm)強度>10A 試體(10cm)>25A 試體(25cm)、試體 5B(5cm)強度>10B 試體(10cm)>25B 試體(25cm)，但應力應變行為愈顯脆性，此等研究結論與前述 Bandis 研究現象一致。但本研究因已知同類型剖面 JRC 相同，僅是長度上不同，故仍造成此一剪力強度差異的原因，必然可推論與試體材料性質之長度因素有關(例如 JCS)。

此外，由圖 27、圖 28 可知：於低正向應力時(粗糙度效應主控)，大小試體強度差異並不顯著：於高正向應力時則會較為明顯，主要節瘤剪裂較為嚴重(見圖 29 以 10B 剖面為例)。顯見在高正向應力作用下材料的強度 JCS 對於剪力強度的貢獻會較多。

同一類型試體(A 型或 B 型)其尖峰膨脹角不因試體尺寸而有太大差異，膨脹曲線近乎平行，因為低正向應力時，其膨脹曲線正是反應粗糙節理的外觀幾何形態，可見經由相仿轉換後，試體之粗糙度不隨剖面長度變化而維持定值。但高應力時，尺寸不同但 JRC 相同試體的尖峰膨脹角就差異頗大，其因在於高正向應力下剪力強度主要由具規模效應的 JCS 所主控。

於低正向應力下，試體僅有極小磨損，試體剪動行為可視為純爬坡型態，此時膨脹角較高，大試體之最大膨脹量較大。於高應力下，節瘤之破壞十分顯著，因而此時之膨脹軌跡是沿著新的裂面進行，故膨脹較不顯著，大小試體之最大膨脹量漸趨接近。

在相同正向應力及 JRC 下，隨著試體長度的增加其尖峰剪位移也隨之增加，應力應變行為愈顯延性，顯示長試體要驅動所有大顆節瘤的阻抗強度或達到最大膨脹角均需較長的錯動或時間才能達到尖峰強度狀態。圖 27 也顯示在相同粗糙度及試體長度下，增加正向應力時其剪位移長度也隨之增加。即在高正向應力時，同時被剪斷的結瘤較多，需剪動較長的距離才會達到尖峰值。

4.2.2 三維節理面

(1) 大小節理面之破壞外觀

於不同正向應力下，觀察大小兩個三維節理面(S10 型及 H20 型)達尖峰剪力強度時，試體之外觀破壞現象。敘述如下：

(I) 如圖 30~圖 31，不論在平行葉理方向或垂直葉理方向剪動，在相同正向應力

下，大小節理面磨損區的形狀和位置皆相似。不同的是，在磨損面積比例由外觀看起來小節理面之磨損面積比例較多，參與抵抗剪動的節瘤較多。

(II) 大小節理面於不同正向應力下其破壞模式十分類似：(i)在低正向應力下(σ_n 為 0.098MPa)，大小節理面表面僅產生輕微磨損，如圖 30 所示，其尖峰剪力強度主要由節理面之粗糙度效應所提供。(ii)隨著正向應力漸增至 0.294MPa 時，大小節理面其磨損面積皆會隨著正向應力的增加而增加，其尖峰剪力強度不僅由節理面之粗糙度與材料之基本摩擦性質所貢獻，尚包含了節理面節瘤之材料強度(JCS)之貢獻。(iii)當正向應力增至 0.490MPa 時，大小節理面之磨損面積仍逐漸增加，且有沿著平行葉理方向持續擴大的趨勢。

(III)就同一節理面而言，大小節理面在 $270^\circ \rightarrow 90^\circ$ 剪動方向之個別磨損形狀較近似長條形，而 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 剪動方向之磨損形狀則近似於圓形或橢圓形。而 $270^\circ \rightarrow 90^\circ$ 剪動方向之磨損區域較 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 方向分散，散佈於整個節理面上，不同於 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 方向之磨損區域僅侷限於某幾處較高角度之節瘤。

(2) 磨損面積之發展

由圖片中可知節理磨損區集中於三區，若觀察其不同應力下隨剪位移發展(圖 32)，可發現在低剪位移量時其磨損區域呈長條形，隨剪位移之增加，節理面上磨損區域會朝垂直葉理之方向發展，但其節理面之磨損區域之擴張亦會順著剪動方向被磨損[1,9,14]。本研究由直剪實驗結果之數位影像以 ArcView 軟體計算得知：大小節理面磨損面積比會隨正向應力的增加而增加，在相同正向應力下，小尺寸節理面磨損面積比例 α_s 皆會高於大節理面(見圖 33)，高應力下更明顯。

由圖 34~圖 35 可發現：不論大節理面或小節理面在 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ (平行葉理方向)之尖峰剪力強度大致上會小於 $270^\circ \rightarrow 90^\circ$ (垂直葉理方向)，尤其當低正向應力時差異性更顯著。其原因是因為 $270^\circ \rightarrow 90^\circ$ 是在垂直葉理的方向，故節理面的粗糙度較大。而於較高應力下($\sigma_n=0.490\text{MPa}$)，兩方向上之剪力強度幾乎相等。

由膨脹曲線(圖 36~圖 37)中可觀察到小節理面尖峰膨脹角會略大於大節理面，此一現象與二維剖面類似。但因大小節理面尖峰膨脹角皆會隨正向應力的增加而減小，因此高正向應力下兩者的差距也越來越小。已知在低應力下 ($\sigma_n=0.098\text{MPa}$)，其膨脹行為可以反應節理表面之粗糙度，大小節理面在此應力下之尖峰膨脹角接近，且膨脹曲線在過尖峰剪力強度前接近重合，可証實兩者粗糙度確實相似。因此在低應力下大小兩相仿粗糙度節理面並無顯著的規模效應。隨正應力之提高，試體損傷程度略增，試體的膨脹受抑制，在較高應力下膨脹角漸小，且此時大小節理面兩者膨脹曲線已不再重合，在尖峰膨脹角約有 $1^\circ \sim 3^\circ$ 不等的差異，兩者粗糙度之異同已無法由膨脹曲線來判定。

從大小節理面剪應力-剪位移曲線可發現：同一應力下，小節理面尖峰剪力強度較大，尤其正向應力越大時其強度差異越顯著。而在低正向應力下 ($\sigma_n=0.098\text{MPa}$)，大小節理面尖峰剪力強度均十分接近(圖 38)。由此可以證明在低正向應力下，剪力強度確實由粗糙度控制，其材料強度 JCS 參與比例較小，但在逐漸增加高應力下，大小節理面 JCS 的效應才逐漸反應在整體節理強度上。

五、結 論

5.1 節瘤等級之研究

- (1) 區別主要節瘤與次要節瘤之量測尺規約是試體長度之 $1/10$ ，取樣間距太大到 $\Delta x/L \geq 1/10$ 時，將會忽略次要節瘤的存在無法反映次要節瘤所造成的差異，粗糙度較高之節理面 JRC 值具有較明顯之尺規效應。
- (2) 在較高應力環境下 ($\sigma_n/JCS \geq 1/20$)，次要節瘤均會被剪斷忽略，不影響 5 階及 40 階膨脹效應之差別，此時節理剪力強度將由主要節瘤所主控。剪力膨脹效應可能是由主要節瘤坡角所主控。
- (3) 將 40 階及 5 階節理面磨損之相對位置進行比對，顯示 40 階節理面之磨損位置乃為 5 階節理面之高角度節瘤，意指三維節理面之磨損位置深受主要節瘤之影響，亦即是三維節理面之磨損行為乃由主要節瘤所控制。

5.2 節瘤規模之研究

- (1) 自我相仿轉換後的長短剖面幾何性質確實是相似的，在節瘤前後相對分佈位置固定條件下，節瘤大小顆並不影響節理破壞形態。
- (2) 在高正向應力作用下材料的強度 JCS 對於剪力強度的貢獻會較多。高正向應力時，同時被剪斷的結瘤較多，需剪動較長的距離才會達到尖峰值。
- (3) 試體長度增加，應力應變行為愈顯延性，顯示長試體要驅動所有大顆節瘤的阻抗強度或達到最大膨脹角均需較長的錯動或時間才能達到尖峰強度狀態。
- (4) 節理面剪力行為與二維剖面類似，大小節理面磨損區的位置相似。不同的是，小節理面之磨損面積比例較多，參與抵抗剪動的節瘤較多，高應力下更明顯。
這點可能是小節理面強度比大節理面較高的原因。

六、參考文獻

1. 王前堯(2001),「以影像處理技術輔助分析節理面殘餘磨損面積」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
2. 李宗德(1983),「模擬岩石節理面剪力強度之規模效應」,碩士論文,國立台灣大學土木工程研究所,台北。
3. 李偉強(2001),「三維節理面磨損行為之研究」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
4. 范又升(2001),「以自我相仿型節理探討 JCS 之規模效應」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
5. 祇中傑(2000),「碎形理論於描述節理面粗糙度之應用」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
6. 祇中傑、楊長義(2000),“節理面二維碎形維度之直接演算法”, 2000 岩盤工程研討會,台中市,第 121-130 頁。
7. 陳俊龍(1998),「節理剖面粗糙度規模效應之研究」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
8. 張文城(1988),「岩石節理面之粗糙度與其剪力強度之研究」,博士論文,國立台灣大學土木工程研究所,台北。
9. 黃俊達(2003),「三維相仿節理面磨損行為之規模效應」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
10. 楊長義、羅世承(1996),“Hurst 指數在節理面粗糙度異向性之應用”,第二屆全國力學會議論文集,台北,第 366-373 頁。
11. 楊長義、黃俊達、李偉強(2003),大小岩石弱面剪力強度之考量,技師月刊 29,台北市土木技師公會, pp.35-40。
12. 楊長義、顏國慶、李偉強(2001),“主要節瘤與次要節瘤在節理面剪力行為之角色”,第九屆大地工程學術研討會,桃園,第 89 頁, CD-Rom Paper No. B006。
13. 楊偉成(1998),「傳立葉級數於分析節理閉合行為之應用」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
14. 顏國慶(2001),「尺規大小在界定節瘤等級之影響」,碩士論文,淡江大學土木工程研究所,台北。
15. Bandis, S., A.C Lumsden, and N. Barton (1981), “Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints,” *International Journal of Rock Mechanics Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-21.
16. Barton, N.R. (1973), “Review of a new shear strength criterion for rock joints,” *Engineering Geology*, Vol.7, pp. 287-332.
17. Barton, N., and Bandis, S. (1982) “Effect of Block Size on The Shear Behavior of Jointed Rock,” *Proc. of the 23rd U.S. Symp. on Rock Mech.*, Berkeley, pp.739-760.
18. Brown, E. T. (1978), *Rock characterization testing & monitoring- ISRM Suggested Method*, Pergamon Press, Oxford.
19. Hurst, H. E., Black, R. P. and Simaika, Y. M. (1965), *Long-term storage: An experimental Study*, Constable, London.
20. Mandelbrot, B. B. (1983), *The fractal geometry of nature*, Freeman, San Francisco.
21. Mandelbrot, B. B. and Ness, J.W. (1968), “Frictional brownian motions, fractional noises and applications,” *SIAM Rev.* 4, pp.422-437.
22. Patton, F.D. (1966), “Multiple model of shear failure in rock,” *Proceedings 1st Congress of ISRM*, Lisbon, pp. 509-513.
23. Raja, J. and Radhakrishnan, V. (1977), “Analysis and synthesis of surface profile using Fourier series,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.17, pp. 245-251.
24. Singh, B. and Goel, R. K. (1999), “Rock mass classification: A practical approach in civil engineering,” Amsterdam:Elsevier science Ltd, UK, pp. 154-155.
25. Tse, R. and Cruden, D.M. (1979), “Estimating joint roughness coefficients,” *International Journal of Rock Mechanics Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 16, pp. 303-307.
26. Yang, Z. Y. and Chen, G. L. (1999), “Application of the self-affinity concept to the scale effect of joint roughness,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 32, pp.221-229.

27. Yang, Z.Y. and Di.C.C. (2002) "A directional method for directly calculating the fractal parameters of joint surface roughness", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 38, No.8, 1201-1210.
28. Yang, Z.Y., Di,C.C. and Lo, S.C. (2001), "Two-dimensional Hurst index of joint surface," *Rock Mechanics and Rock Engineering* , Vol. 34, No.4, 323-345.
29. Yang, Z. Y., Di, C. C. and Yen, K. C. (2001), "The effect of asperity order on the roughness of rock joint," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.38, pp.745-752.
30. Yang, Z.Y. and Li, W.C. (2002), "Generation of the 3D joint surface using LOM technology," *ASCE's First Virtua World Congress for Civil Engineering* , p. 10 .
31. Yang, Z. Y. and Lo, S. C. (1997), "An index for describing the anisotropy of joint surface," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, pp.1031-1044.

表 1. 二維節理剖面之剪力強度及膨脹角試驗結果

(a) A 節理剖面

Normal stress (MPa)	Shear strength τ_p (MPa)		Dilation angle i (°)	
	5-order	40-order	5-order	40-order
0.098	0.147	0.215	13.56	19.27
0.294	0.424	0.496	12.14	14.86
0.392	0.562	0.627	11.85	14.54
0.491	0.746	0.778	9.25	10.58
0.687	0.998	1.034	8.31	10.36

(b) B 節理剖面

Normal stress (MPa)	Shear strength τ_p (MPa)		Dilation angle i (°)	
	5-order	40-order	5-order	40-order
0.098	0.141	0.240	12.25	19.45
0.294	0.382	0.534	11.49	15.36
0.491	0.639	0.713	10.63	10.84
0.687	0.867	0.926	9.65	9.39

表 2. 三維節理表面之剪力強度及膨脹角試驗結果

方位 (°)	Normal stress (MPa)	Shear strength τ_p (MPa)		Dilation angle i (°)	
		5-order	40-order	5-order	40-order
0	0.098	0.115	0.165	9.35	13.06
	0.294	0.362	0.383	6.52	8.63
	0.491	0.562	0.587	4.28	6.35
90	0.098	0.169	0.246	17.22	20.89
	0.294	0.413	0.537	13.68	14.28
	0.491	0.733	0.881	8.56	8.84
180	0.098	0.122	0.140	6.14	8.17
	0.294	0.274	0.367	2.60	5.58
	0.491	0.549	0.588	3.19	3.01
270	0.098	0.151	0.162	11.26	14.50
	0.294	0.382	0.452	7.71	10.62
	0.491	0.582	0.677	6.70	6.68

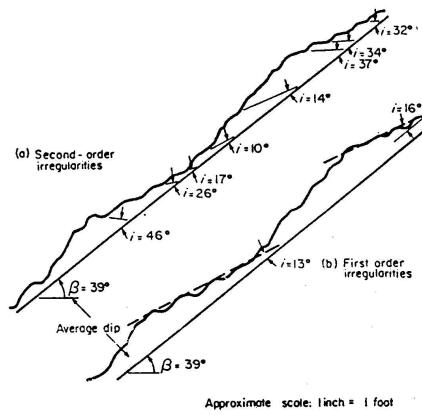
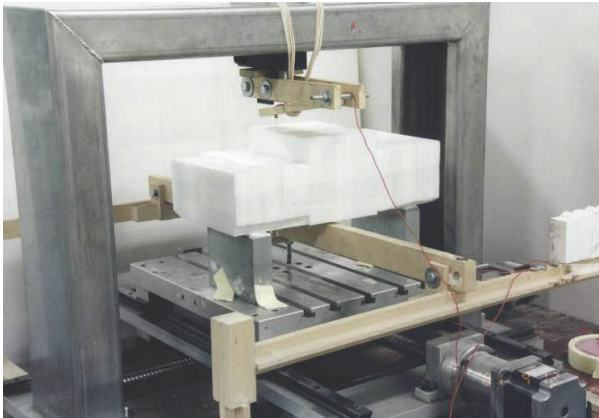
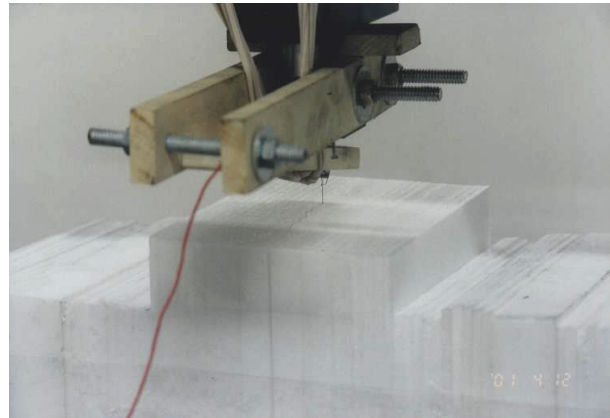


圖 1. 主要節瘤及次要節瘤之定義



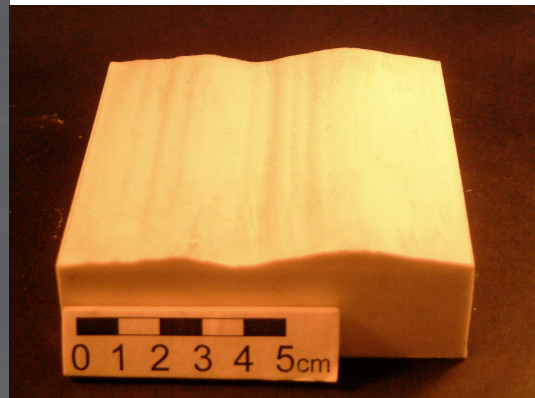
(a) 切割珍珠板剖面架設



(b) 切割珍珠板剖面近景



(c) 成型的珍珠板剖面成品



(d) 翻製矽膠節理母模

圖 2. 改裝剖面儀切割珍珠板以製造二維節理剖面

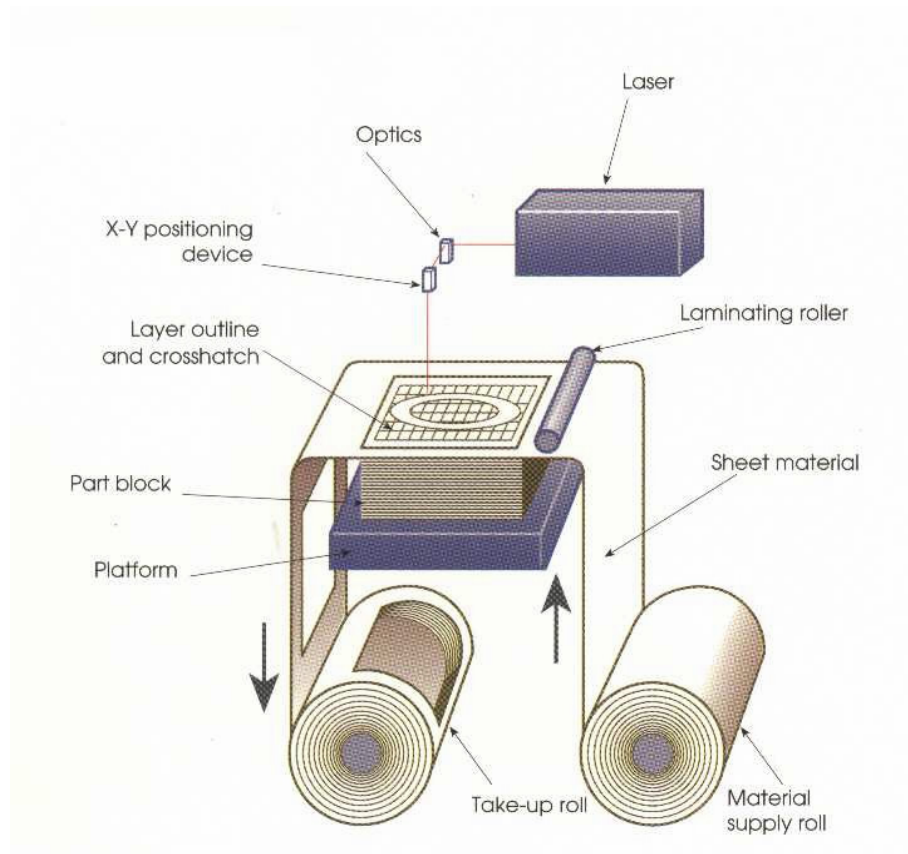


圖 3. LOM 技術之層層套疊切割示意與 10cm 立體節理模型成品

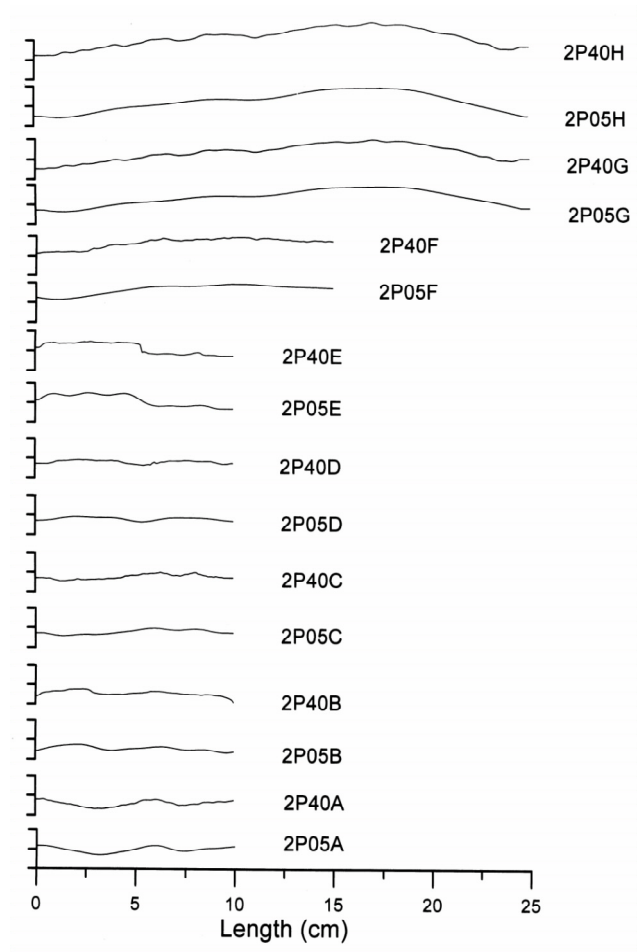
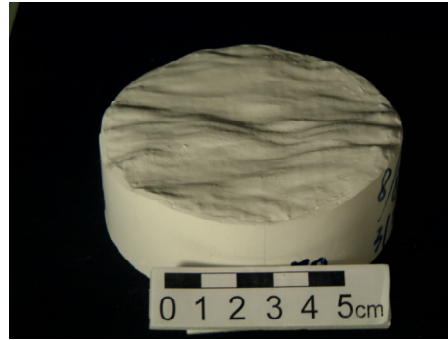


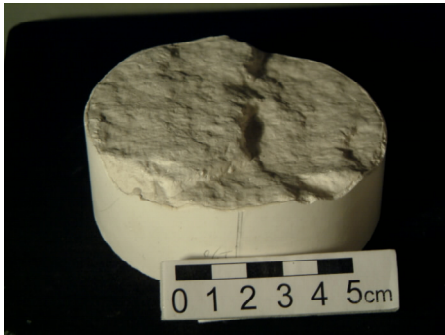
圖 4. 受檢測的二維相仿節理面



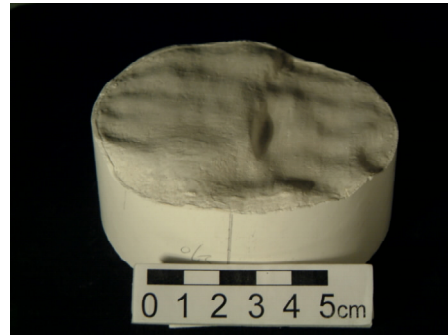
(a) 片岩 [3P40A]



[3P05A]



(b) 砂岩 [3P40B]



[3P05B]

圖 5. 具各級節瘤之三維節理表面

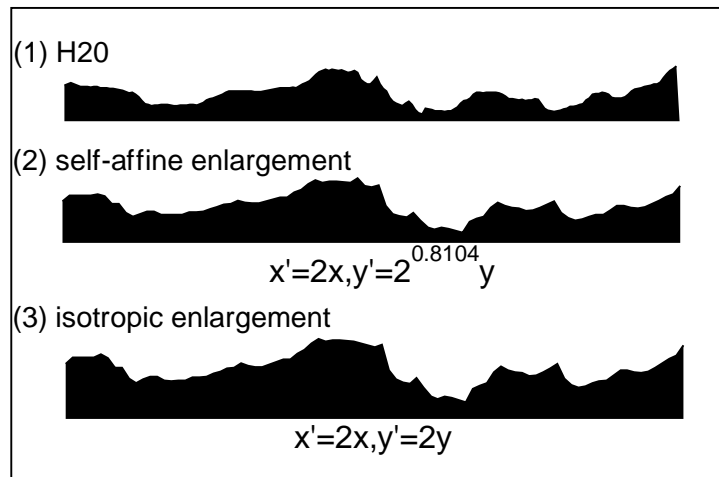


圖 6. 經自我相仿放大和等倍率放大之剖面線

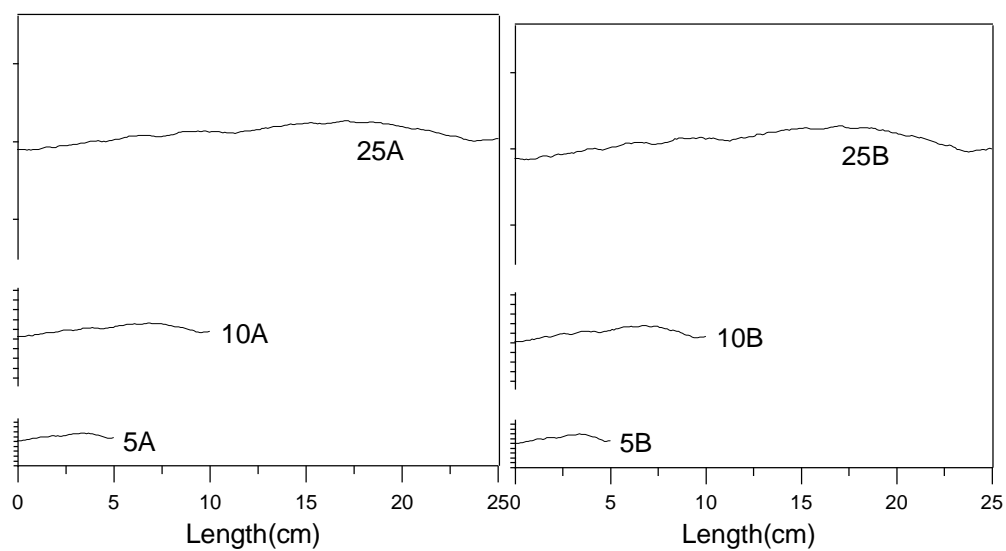


圖 7. 長短相仿剖面高程曲線



圖 8. 珍珠版成型模具

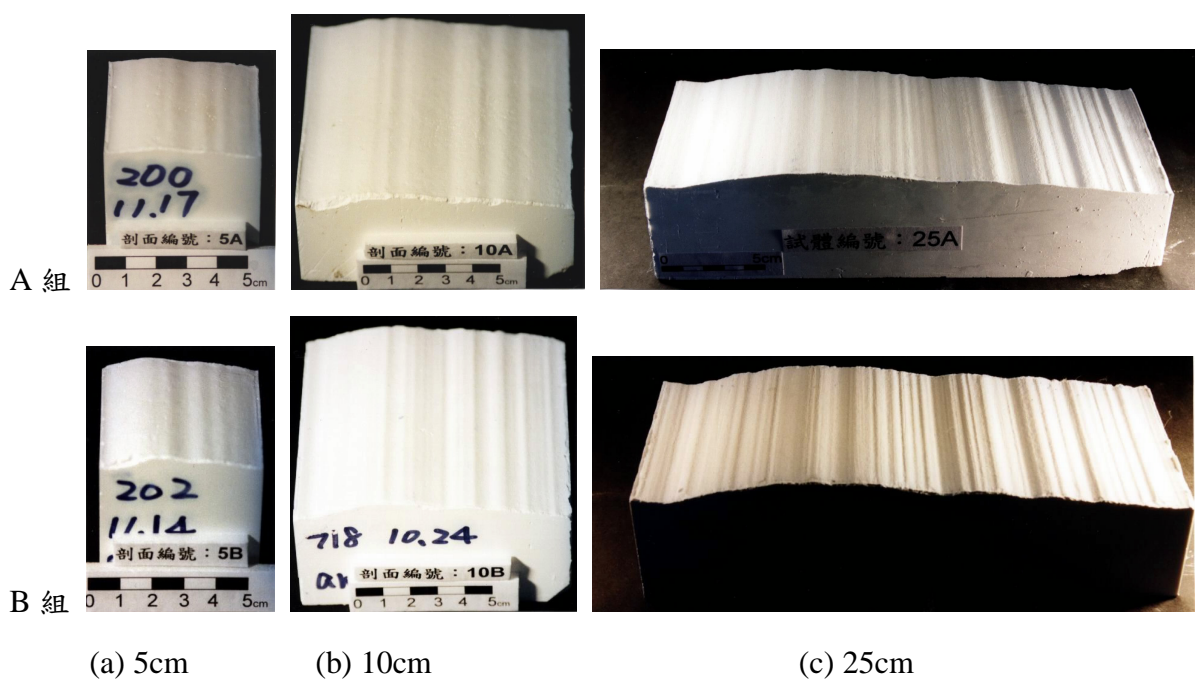
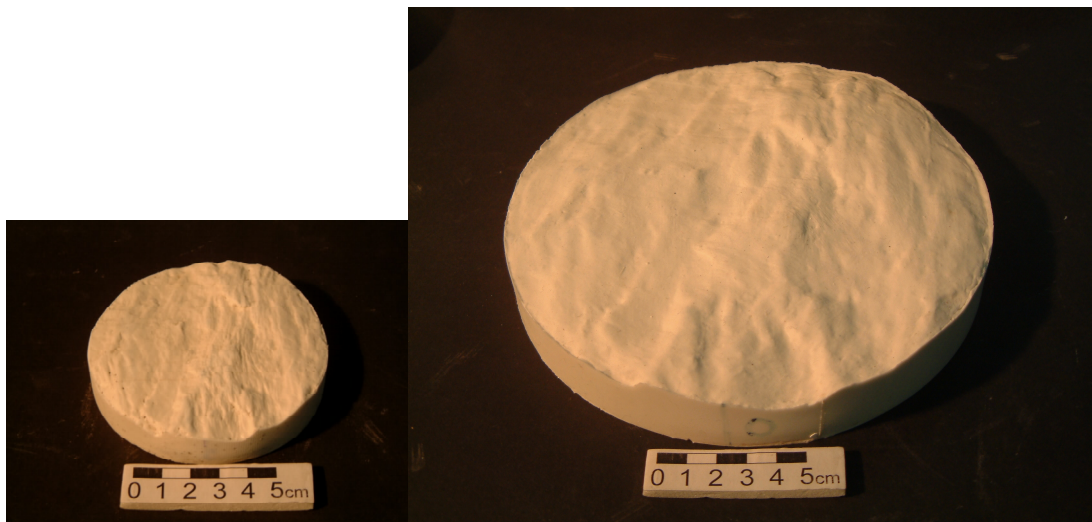


圖 9. 粗糙度自我相仿的大小剖面



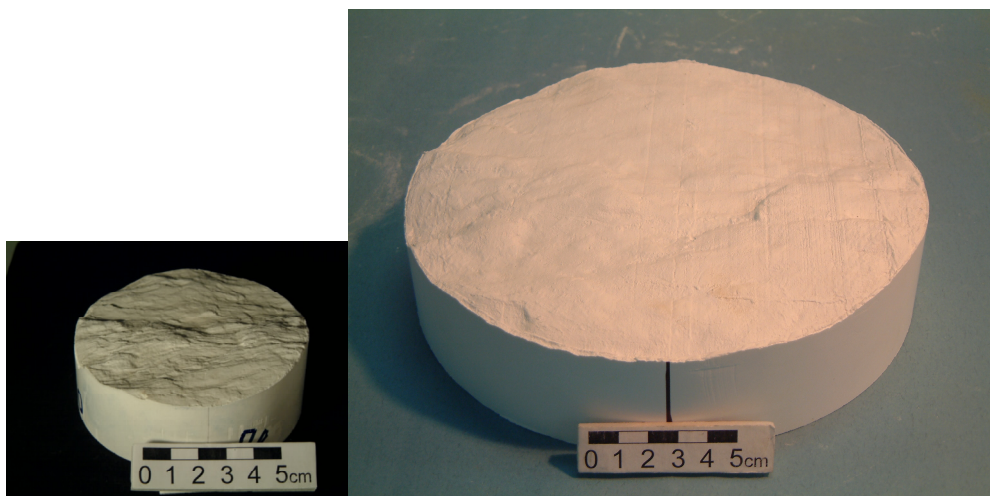
圖 10. 20cm 相仿放大的 LOM 立體節理模型成品



S10 型(10cm)

H20 型(20cm)

圖 11. 粗糙度自我相仿的大小矽膠模具



(a) $L = 10\text{ cm}$

(b) $L = 20\text{ cm}$

圖 12. 粗糙度自我相仿的大小石膏模型

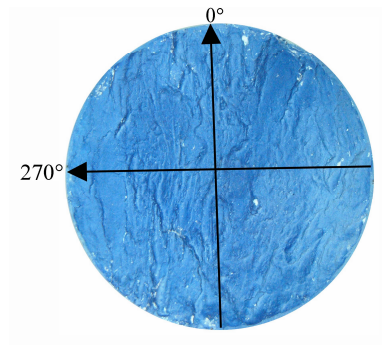
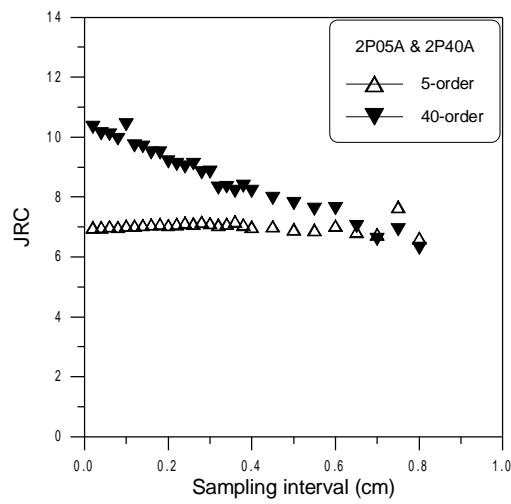
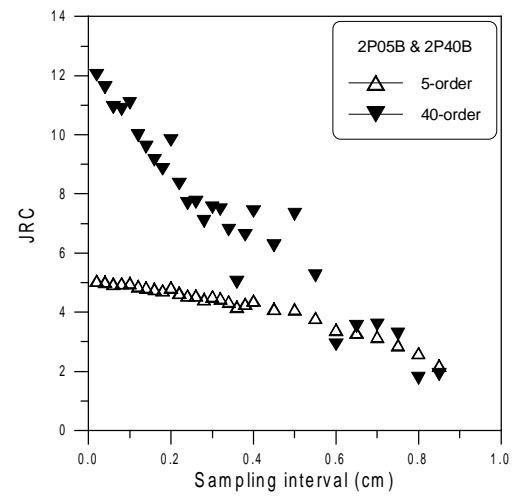


圖 13. 剪動方向之定義

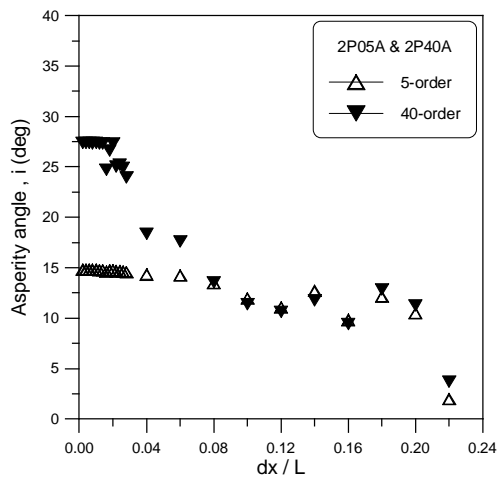


(a) A 節理剖面

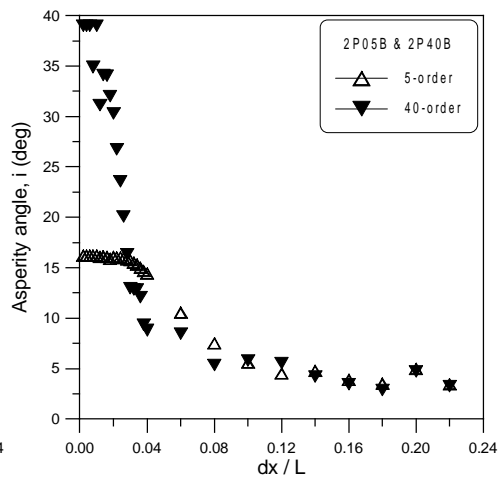


(b) B 節理剖面

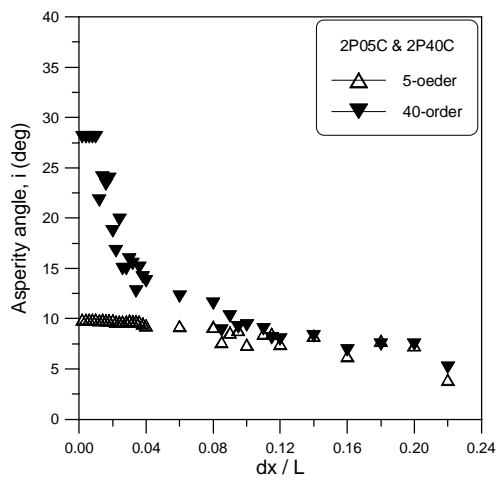
圖 14. 二維節理面 JRC 與取樣間距之變化



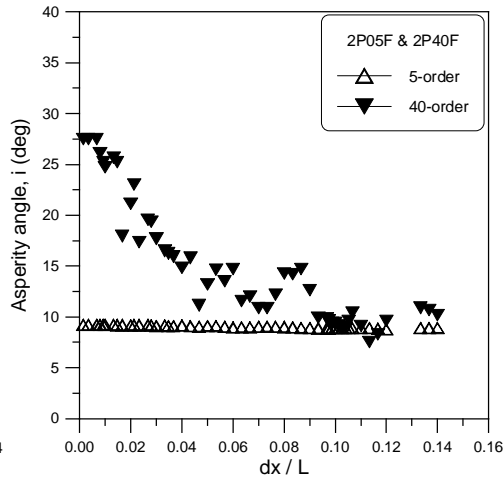
(a) A profile (L=10cm)



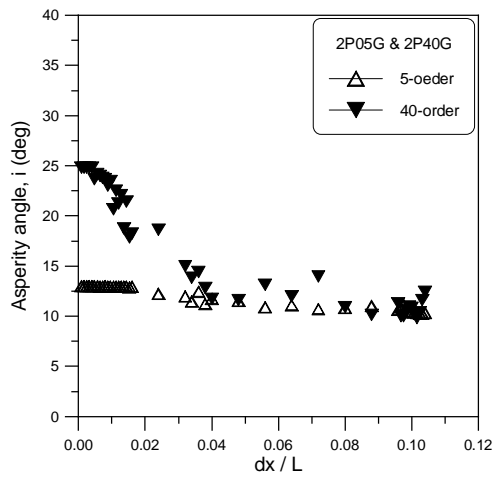
(b) B profile (L=10cm)



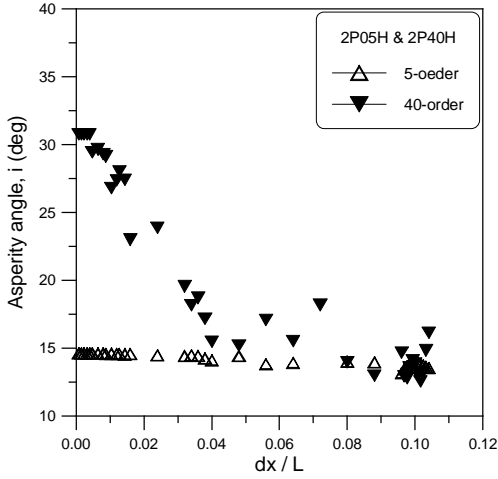
(c) C profile (L=10cm)



(d) F profile (L=15cm)



(e) G profile (L=25cm)



(f) H profile (L=25cm)

圖 15. 二維節理面節瘤坡角與取樣間距之變化

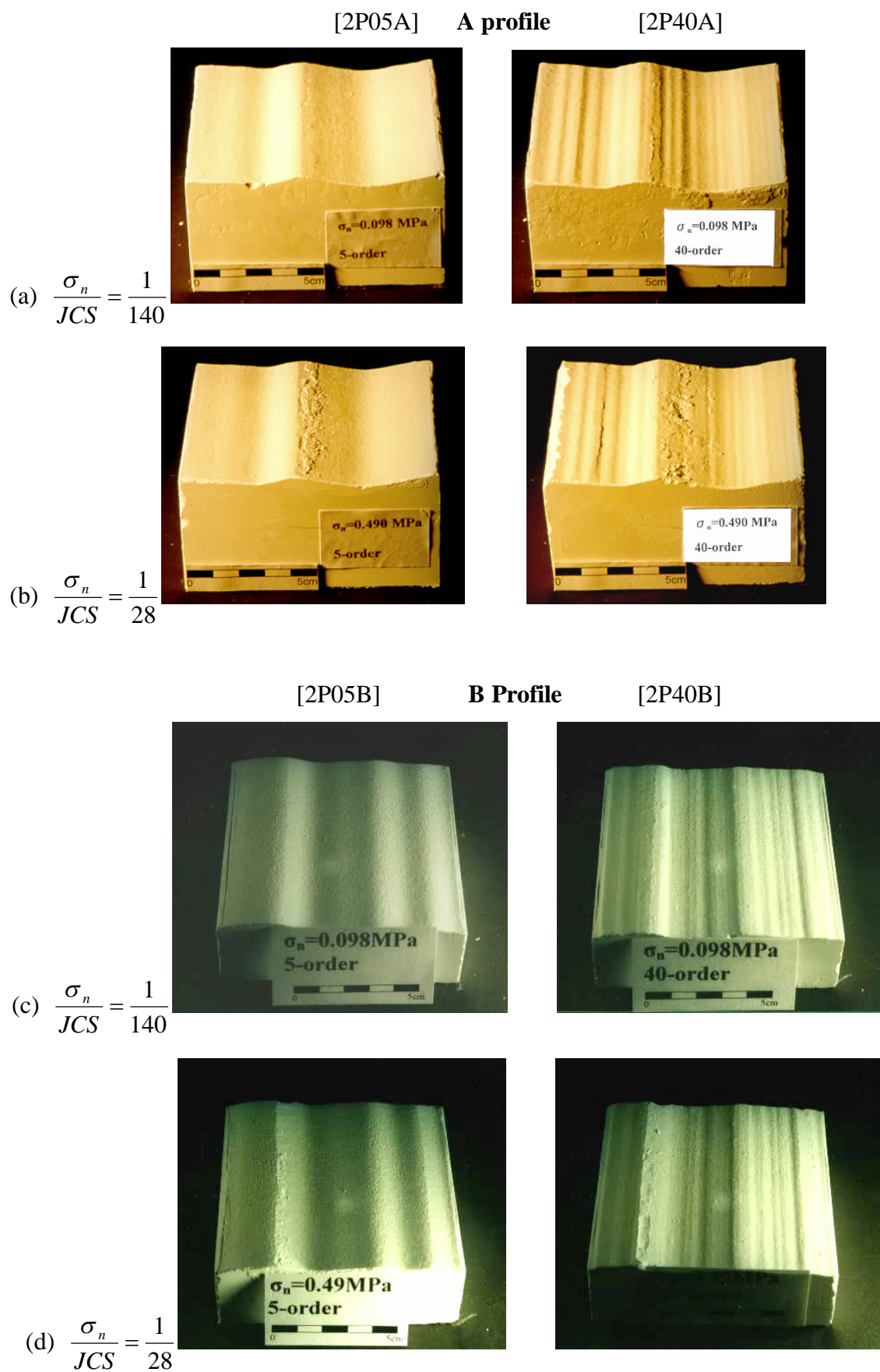
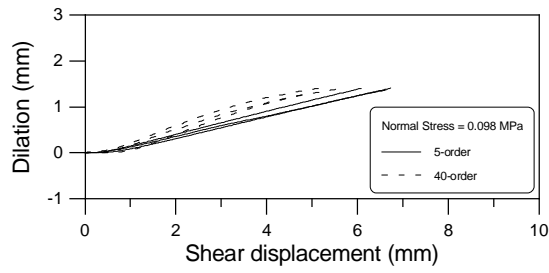
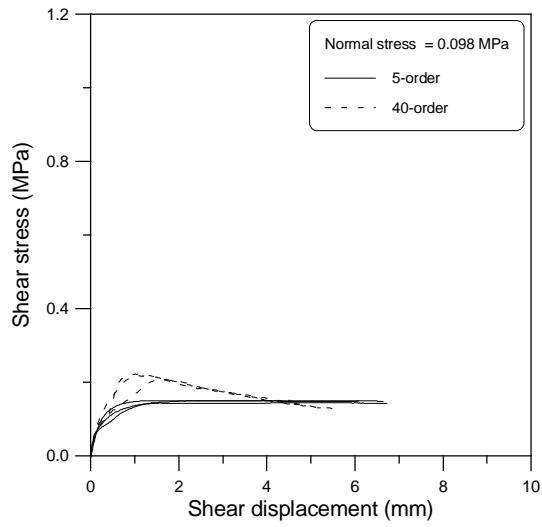
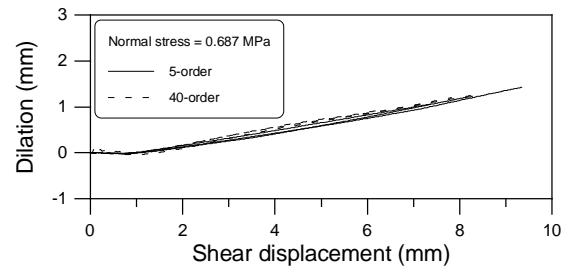
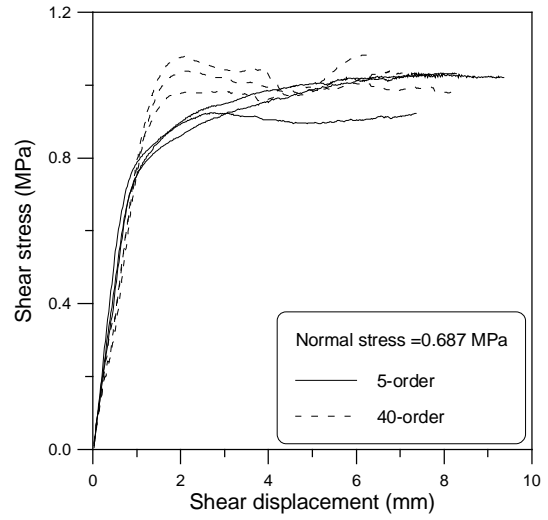


圖 16. 二維節理剖面在剪動後之破壞情形比較

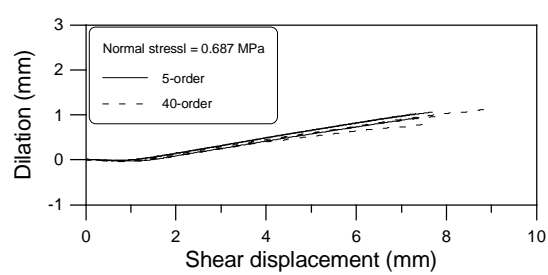
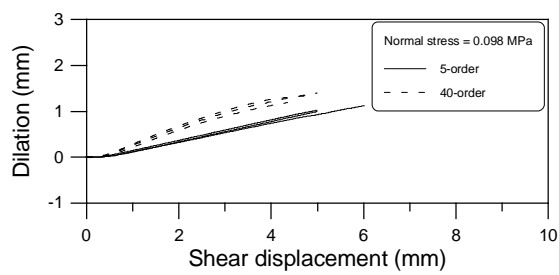
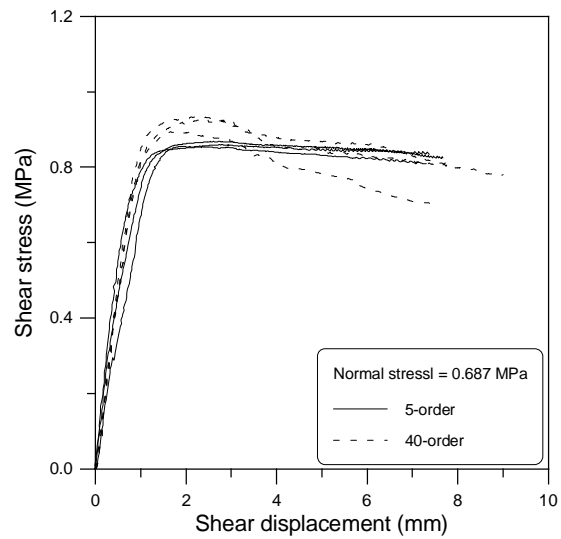
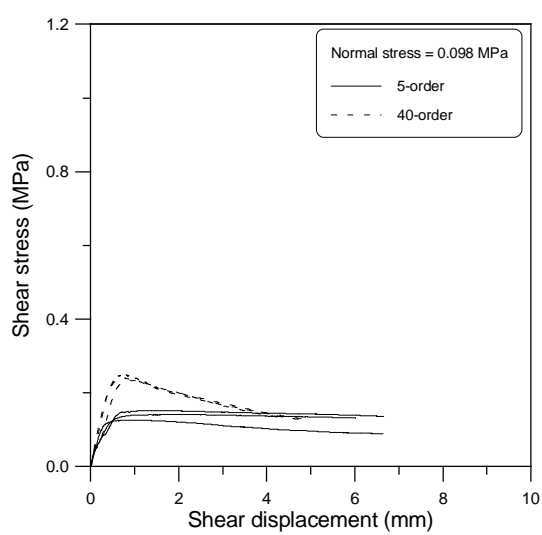


(a) $\frac{\sigma_n}{JCS} = \frac{1}{140}$



(b) $\frac{\sigma_n}{JCS} = \frac{1}{20}$

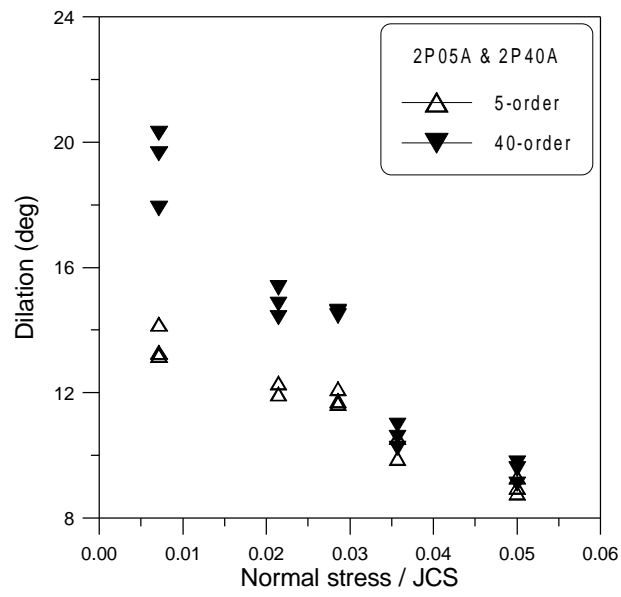
圖 17. A 節理剖面之剪力行為【註：每一個應力環境下均有三個重複性試驗】



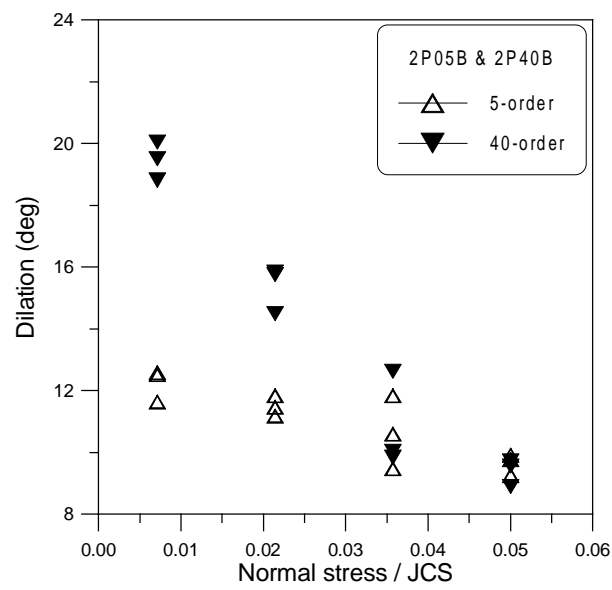
(a) $\frac{\sigma_n}{JCS} = \frac{1}{140}$

(b) $\frac{\sigma_n}{JCS} = \frac{1}{20}$

圖 18. B 節理剖面之剪力行為

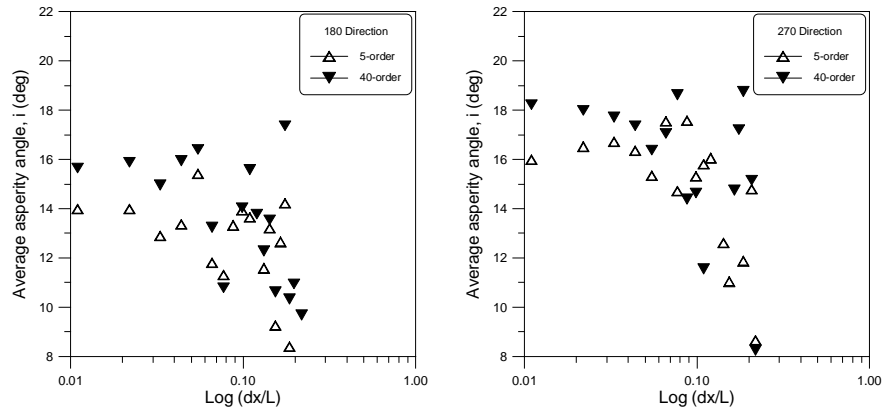


(a) A profile

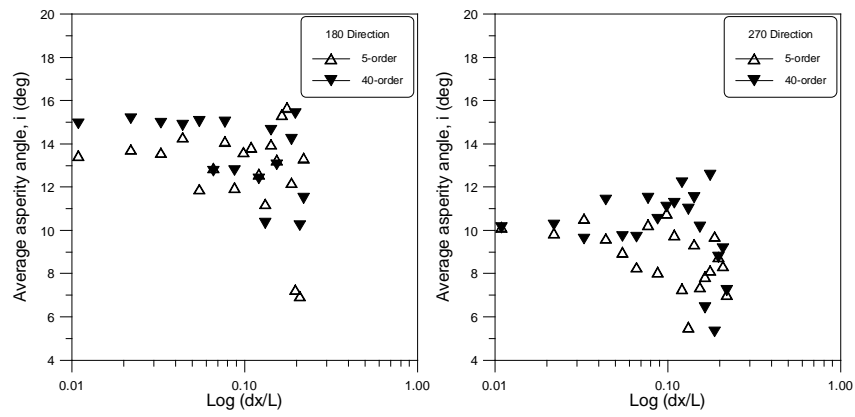


(b) B profile

圖 19. 節瘤膨脹角與正向應力之變化



(a) Surface A



(b) Surface B

圖 20. 三維節理面節瘤平均上坡角與基準面積之變化

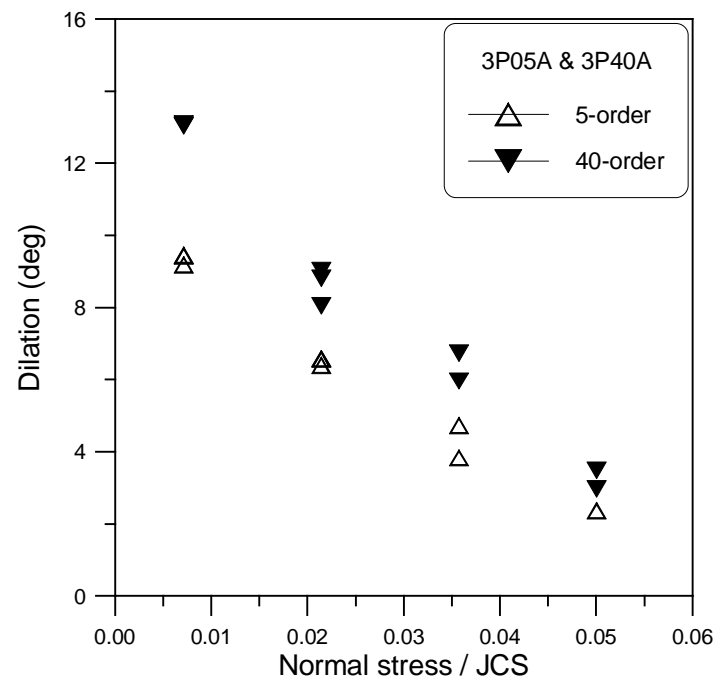
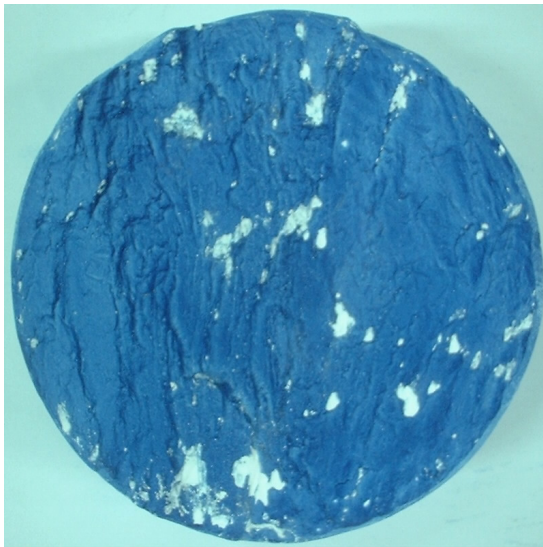


圖 21. 三維節理表面膨脹角與正向應力之變化

(a) 180°

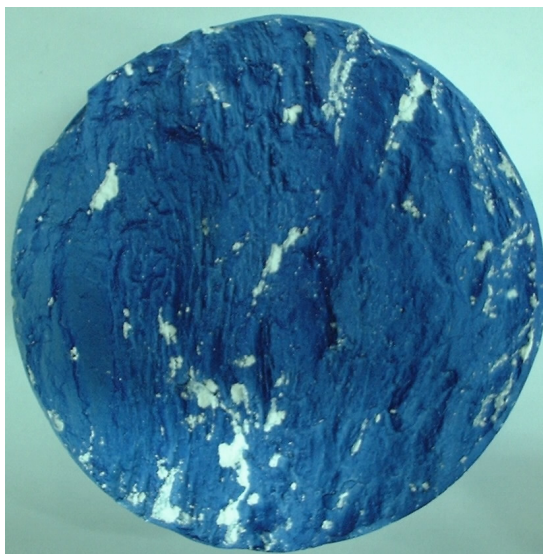


40 階節理面

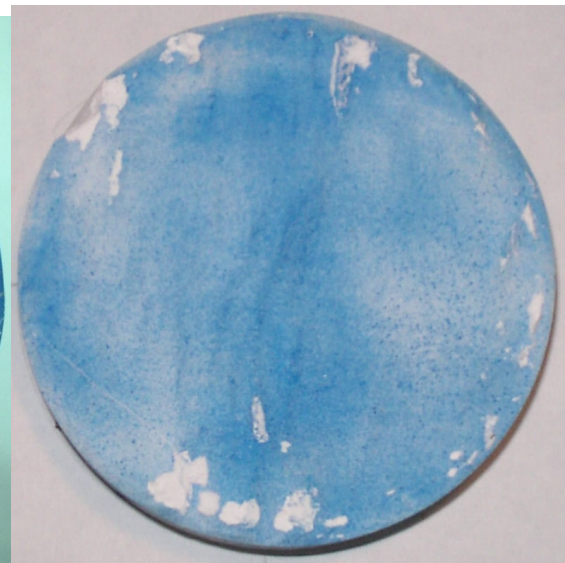


5 階節理面

(b) 90°



(a) 40 階節理面



(b) 5 階節理面

圖 22. 低應力下($\sigma_n/JCS=1/140$)，40 階及 5 階節理面磨損位置之比較

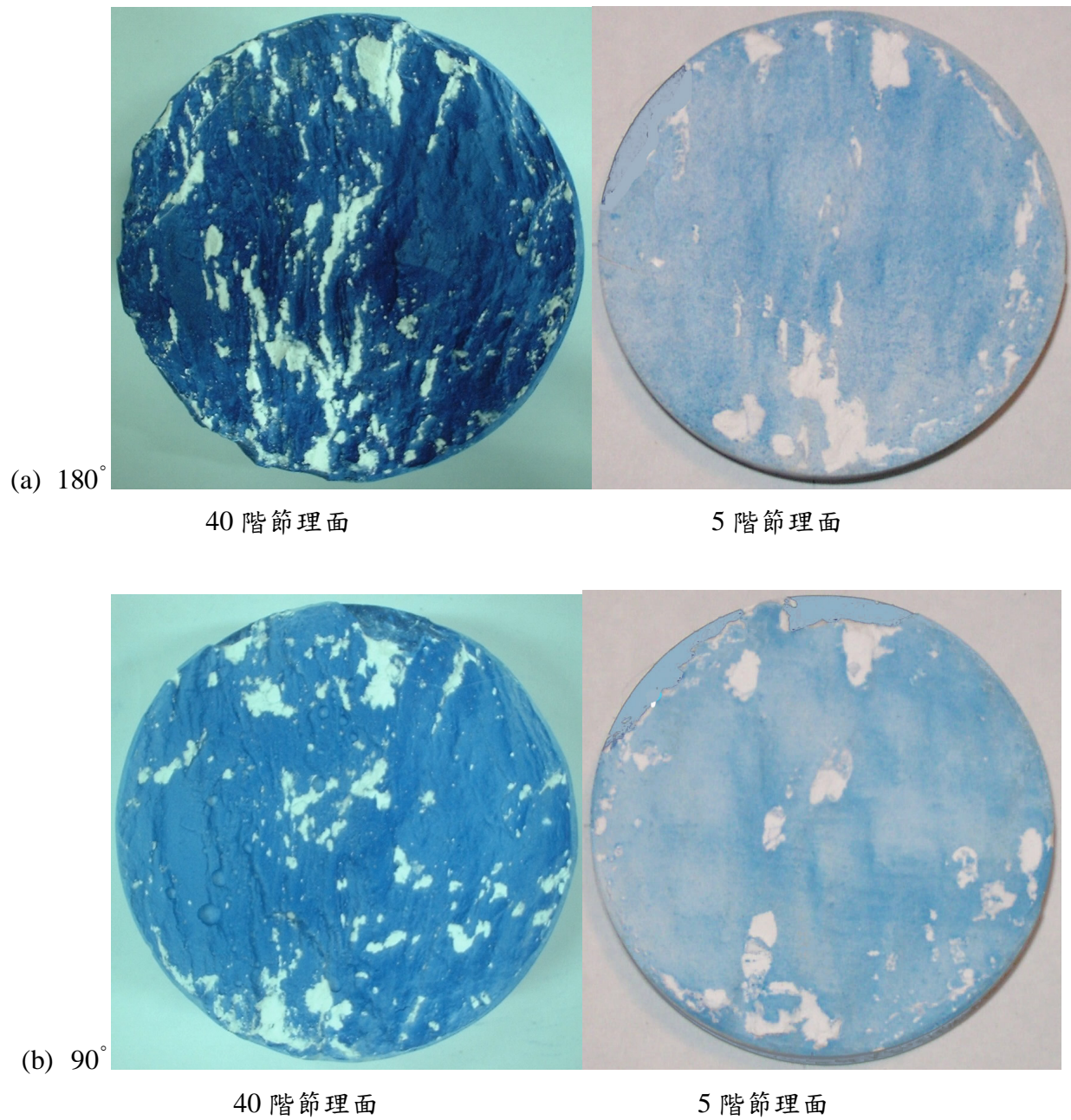
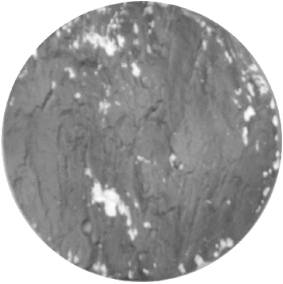
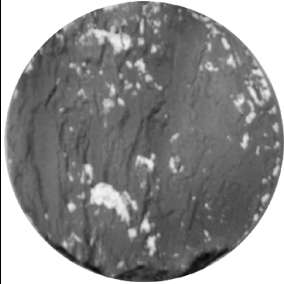
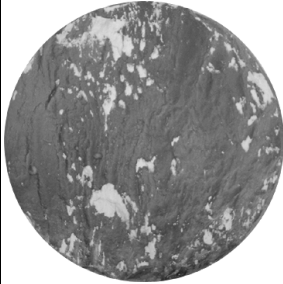
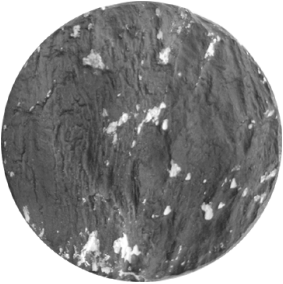
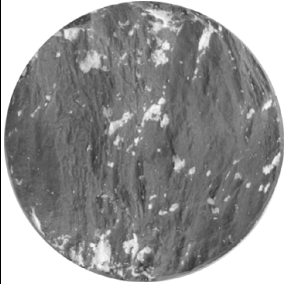
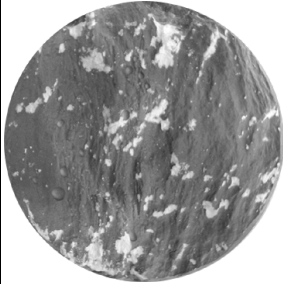
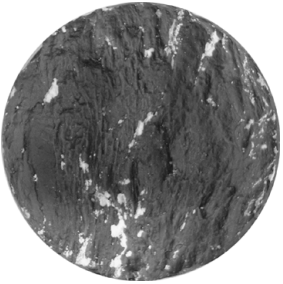
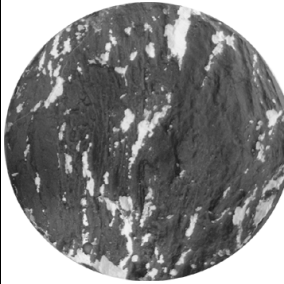
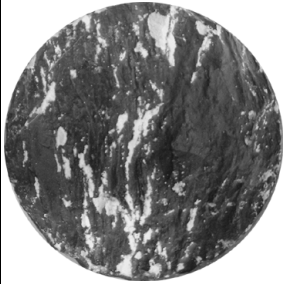
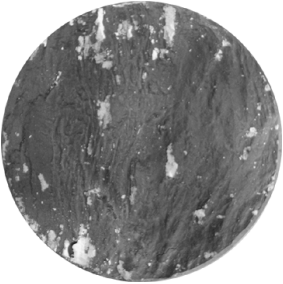
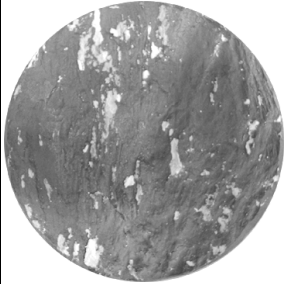

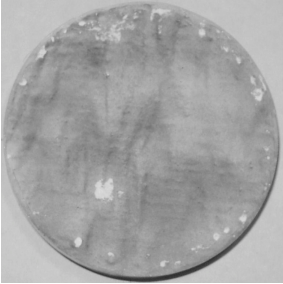

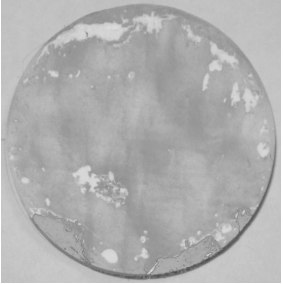
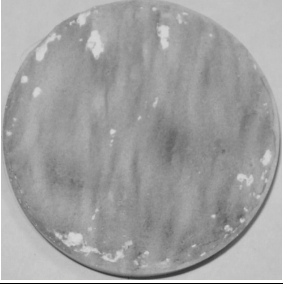

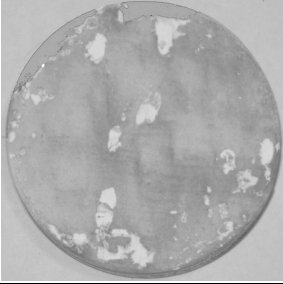
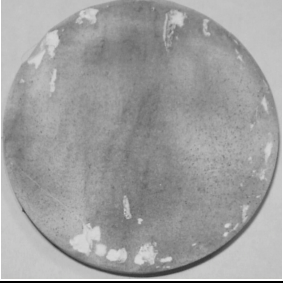
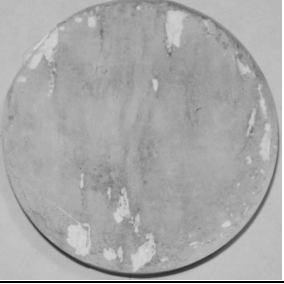
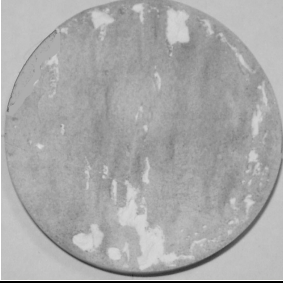
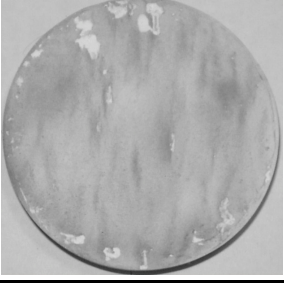
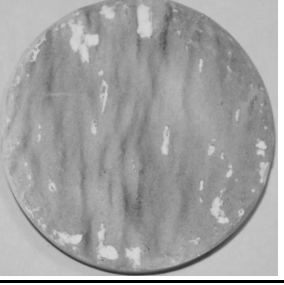
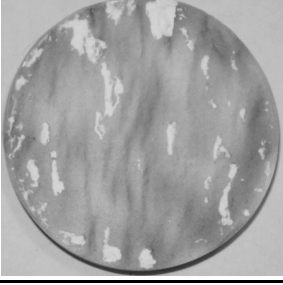


圖 23. 高應力下($\sigma_n/JCS=1/20$)，40 階及 5 階節理面磨損位置之比較

		(a) $\sigma_n = 0.098 \text{ MPa}$	(b) $\sigma_n = 0.294 \text{ MPa}$	(c) $\sigma_n = 0.490 \text{ MPa}$
平行葉理方向	0° 剪動方向↓			
	180° 剪動方向↑			
垂直葉理方向	90° 剪動方向←			
	270° 剪動方向→			

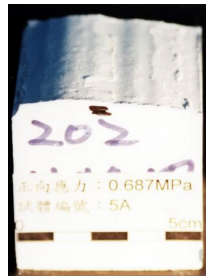
【註：“←”表示下盤試體之剪動方向】

圖 24. 40 階節理面磨損位置分佈圖

		(a) $\sigma_n = 0.098 \text{ MPa}$	(b) $\sigma_n = 0.294 \text{ MPa}$	(c) $\sigma_n = 0.490 \text{ MPa}$
平行葉理方向	0° 剪動方向↓			
	180° 剪動方向↑			
垂直葉理方向	90° 剪動方向←			
	270° 剪動方向→			

【註：“←”表示下盤試體之剪動方向】

圖 25. 5 階節理面磨損位置分佈圖



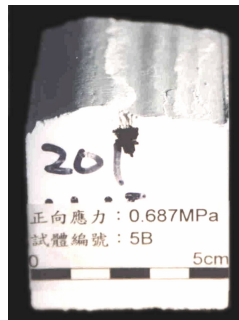
(a) 5A



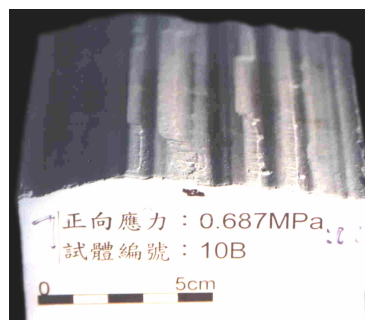
(b) 10A



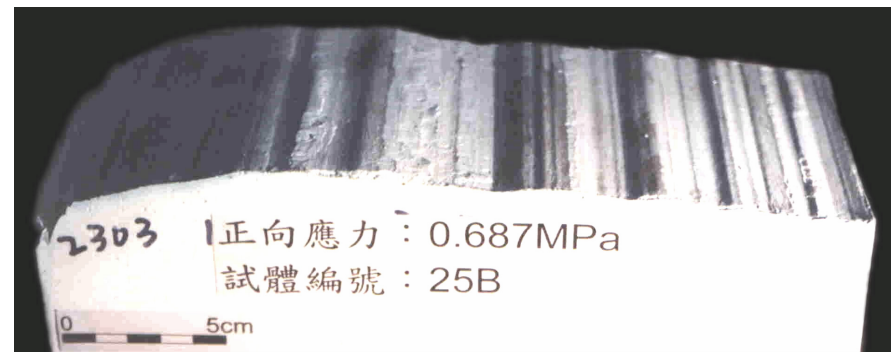
(c) 25A



(a) 5B

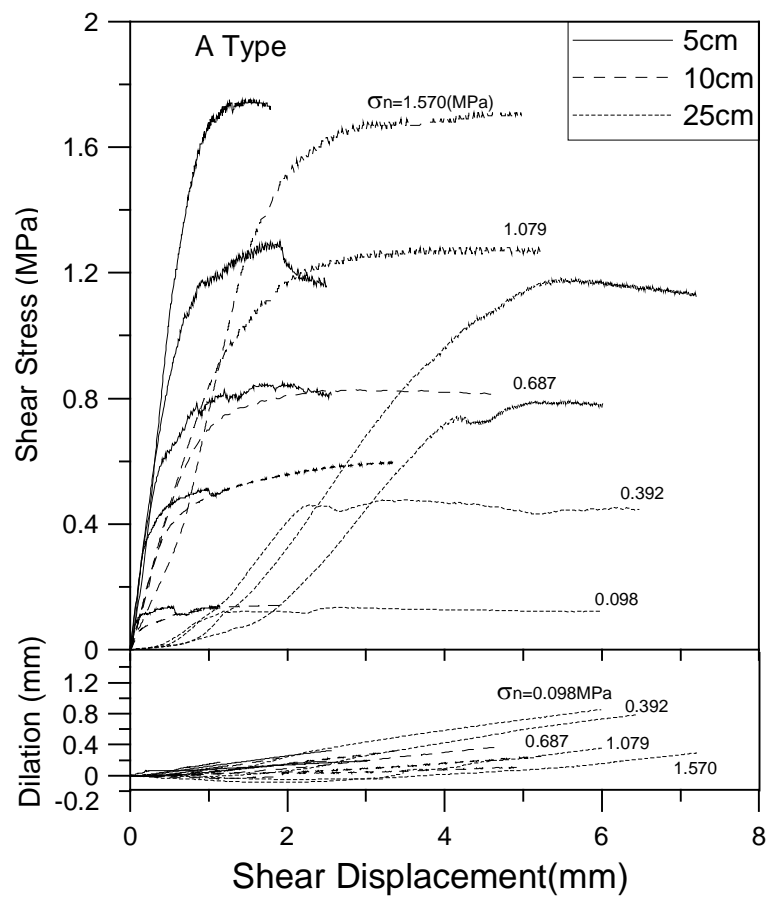


(b) 10B

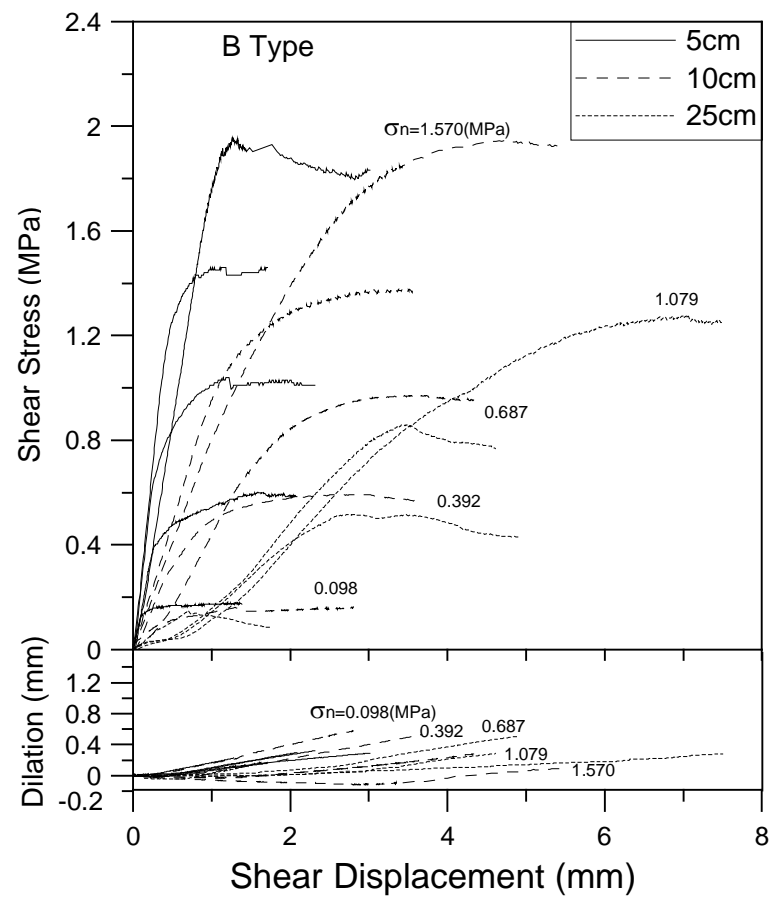


(c) 25B

圖 26. 粗糙度相仿、但不同長度剖面之節瘤破壞狀況比較

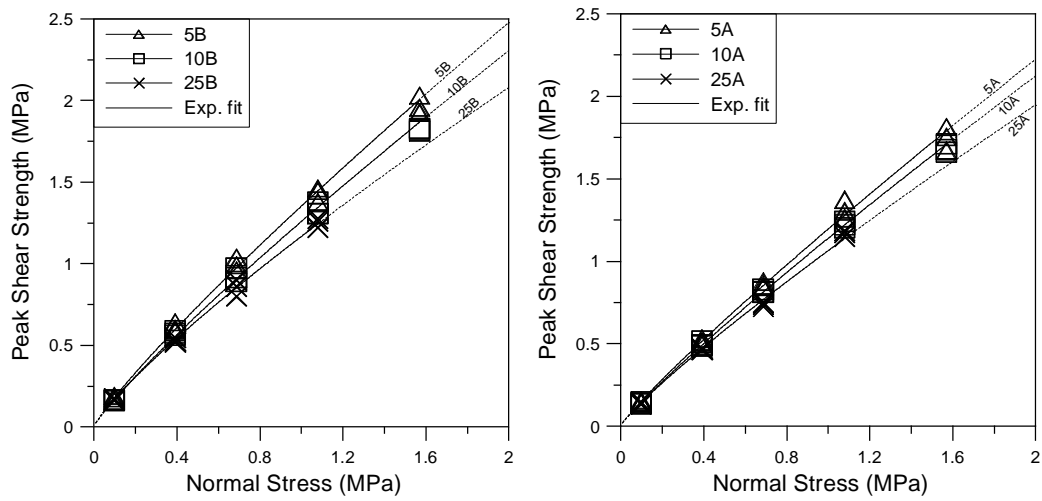


(a) A 型剖面

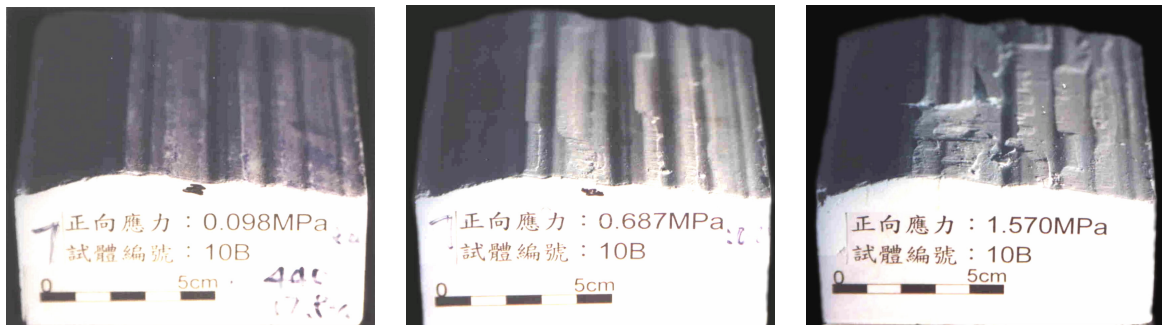


(b) B 型剖面

圖 27. 高低應力下，大小試體之剪應力-剪應變與膨脹曲線比較



(a) A 型剖面 (b) B 型剖面
圖 28 高低應力下、長短剖面之尖峰剪力強度比較



(a) $\sigma_n = 0.098 \text{ MPa}$ (b) $\sigma_n = 0.687 \text{ MPa}$ (c) $\sigma_n = 1.570 \text{ MPa}$
圖 29. 高低應力下、剖面剪動後 (10B) 之外觀破壞現象

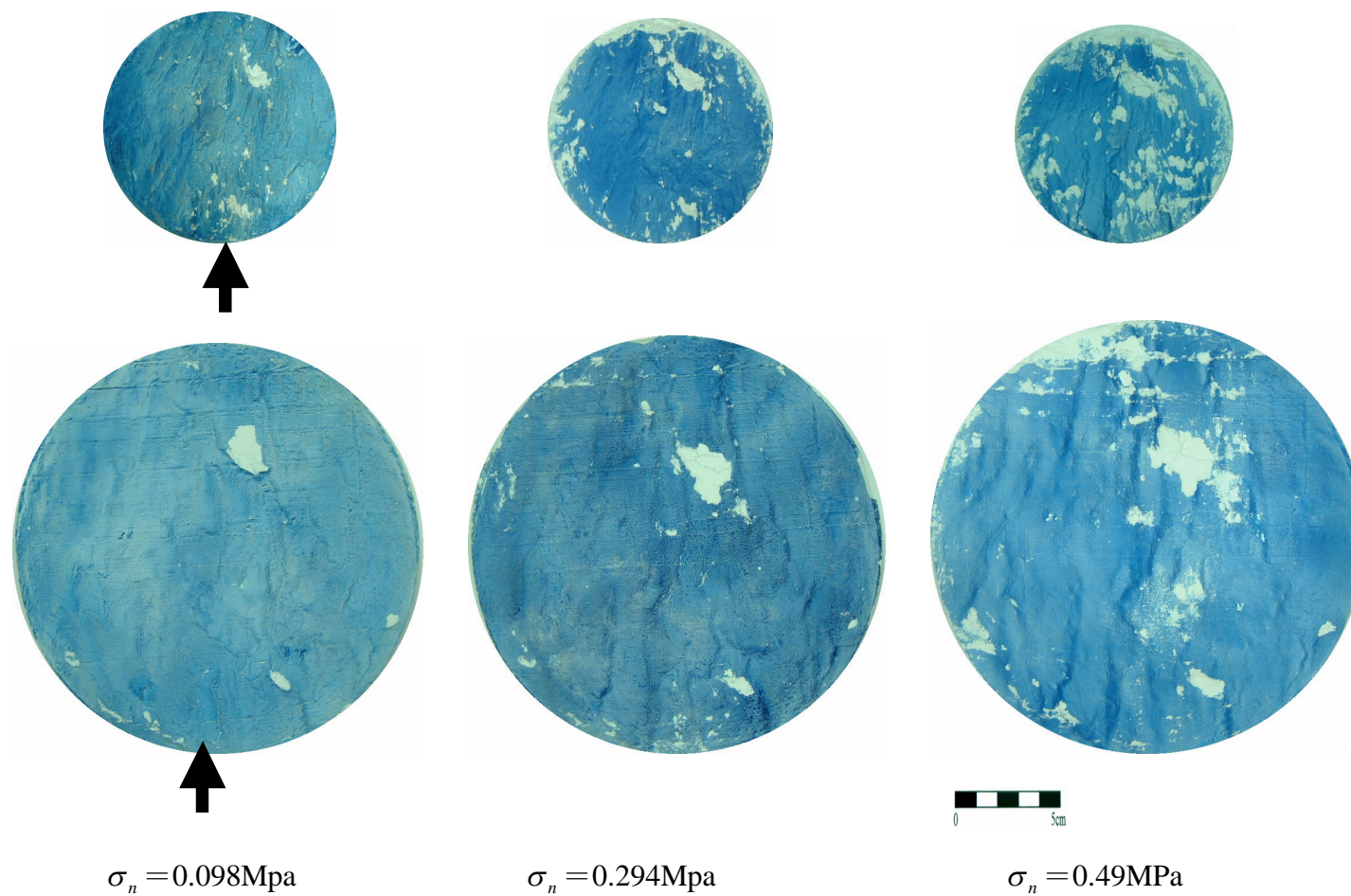


圖 30. 剪動方向在平行葉理走向 (0° 剪動方向) 之磨損狀況

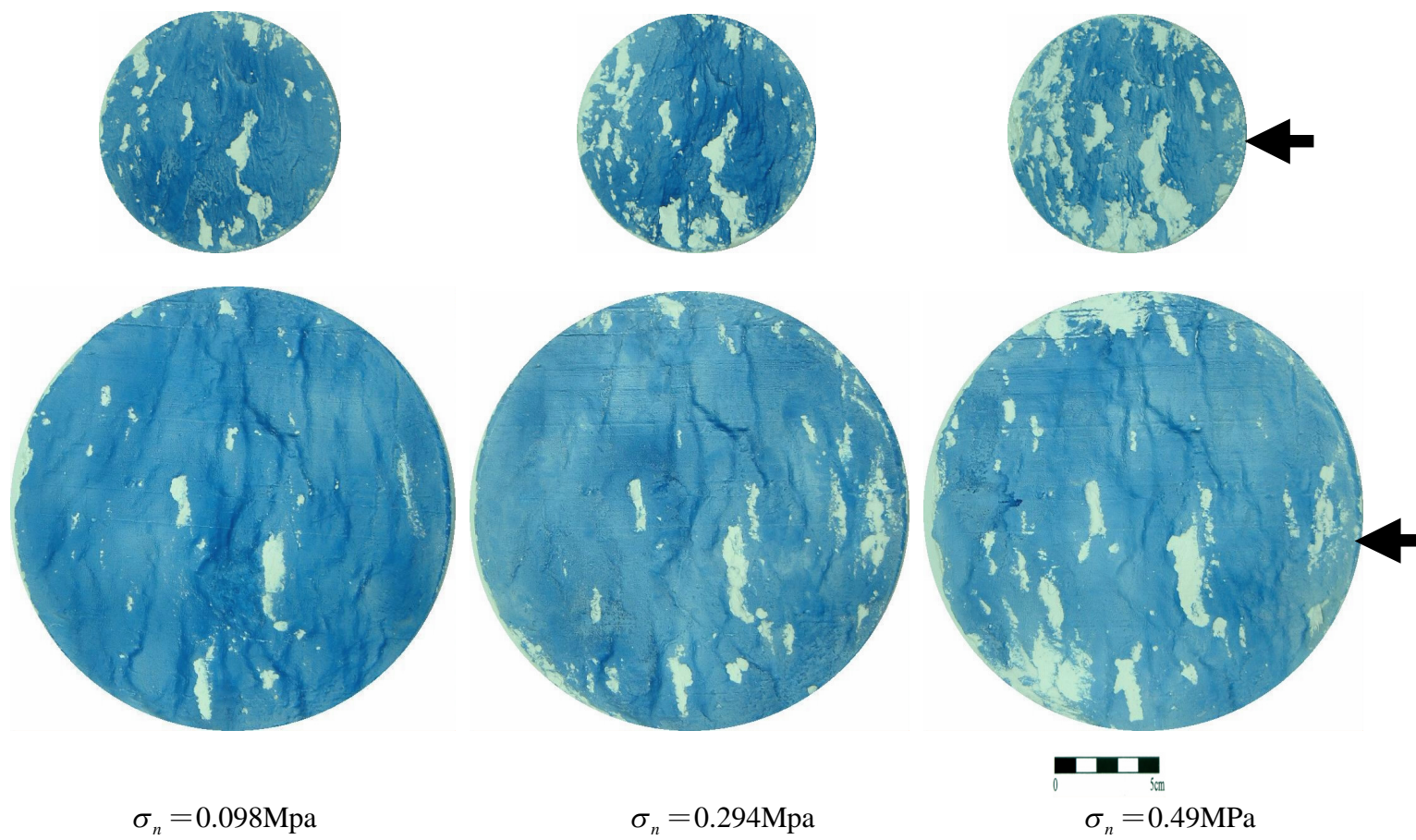
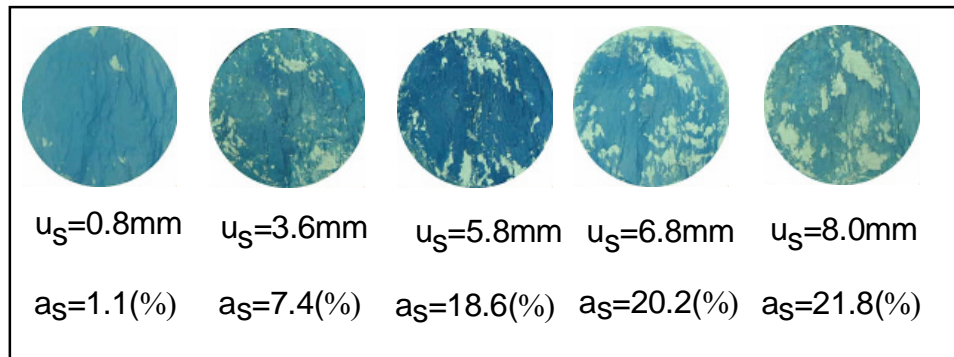


圖 31 剪動方向在平行葉理走向 (270°剪動方向) 之磨損狀況

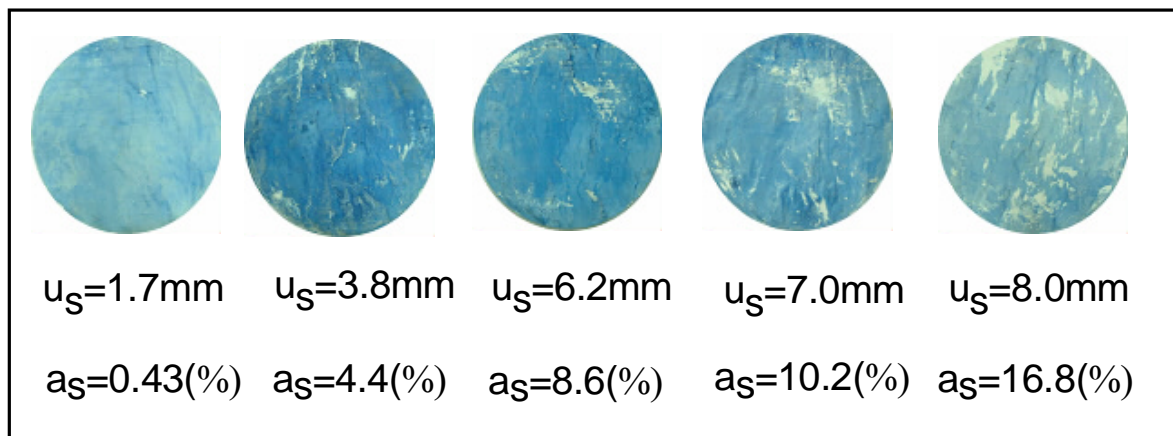


(註:尖峰剪位移 $u_s=5.8\text{mm}$ 、 a_s 為磨損面積比)



5cm

(a) 10cm 節理面



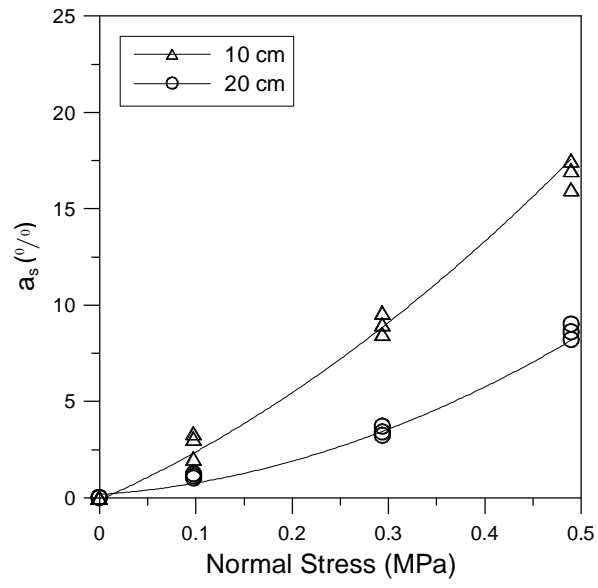
(註:尖峰剪位移 $u_s=6.2\text{mm}$ 、 a_s 為磨損面積比)



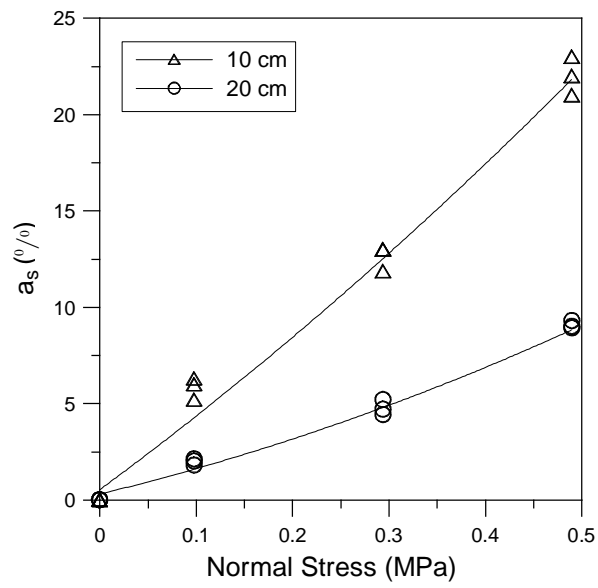
5cm

(b) 20cm 節理面

圖 32. 大節理面 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 方向上磨損面積之發展($\sigma_n=0.490\text{MPa}$)

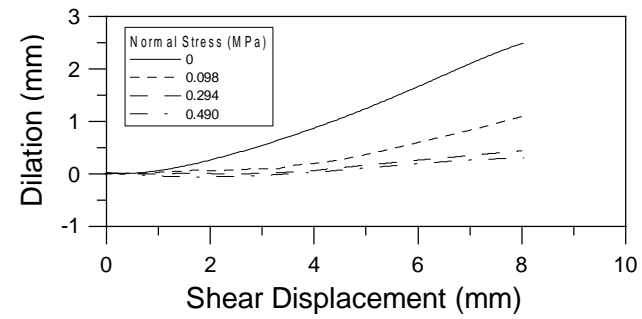
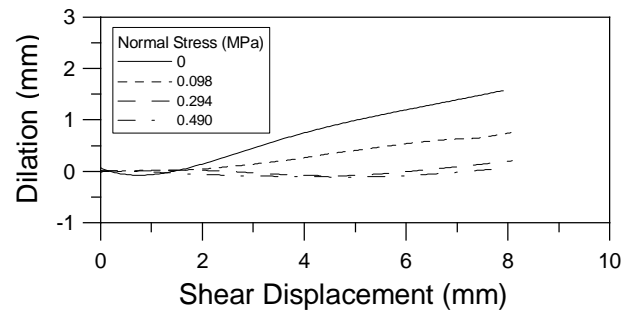
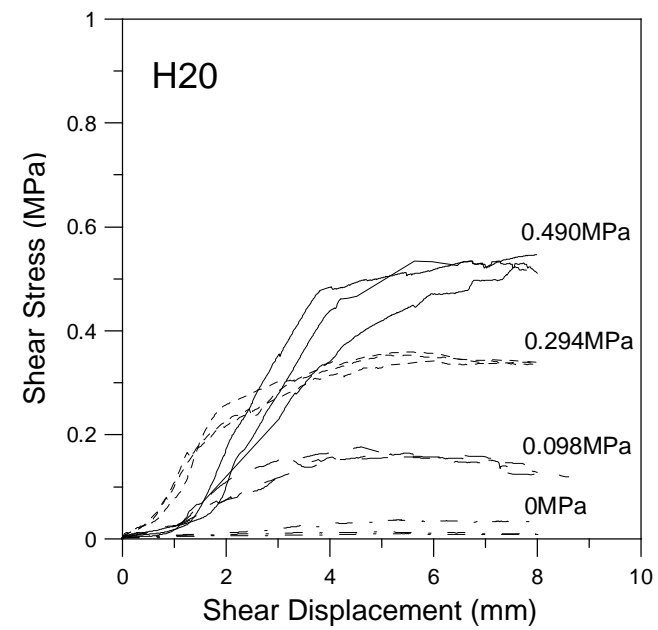
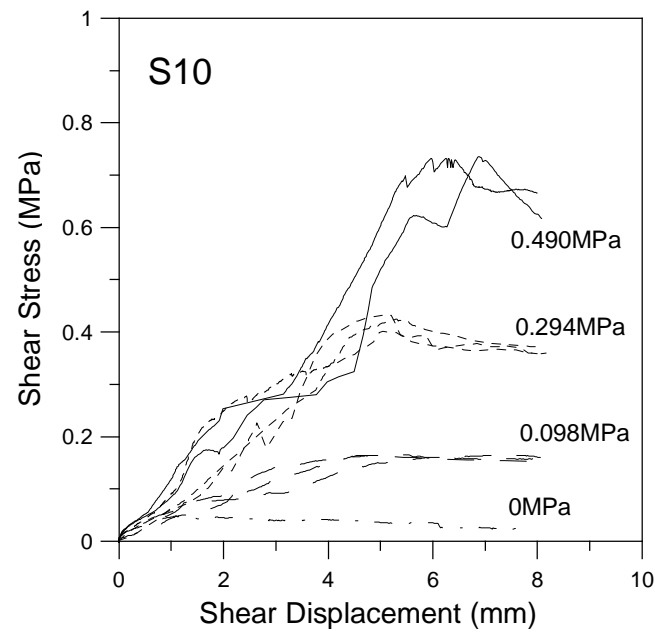


(a) $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 方向



(b) $270^\circ \rightarrow 90^\circ$ 方向

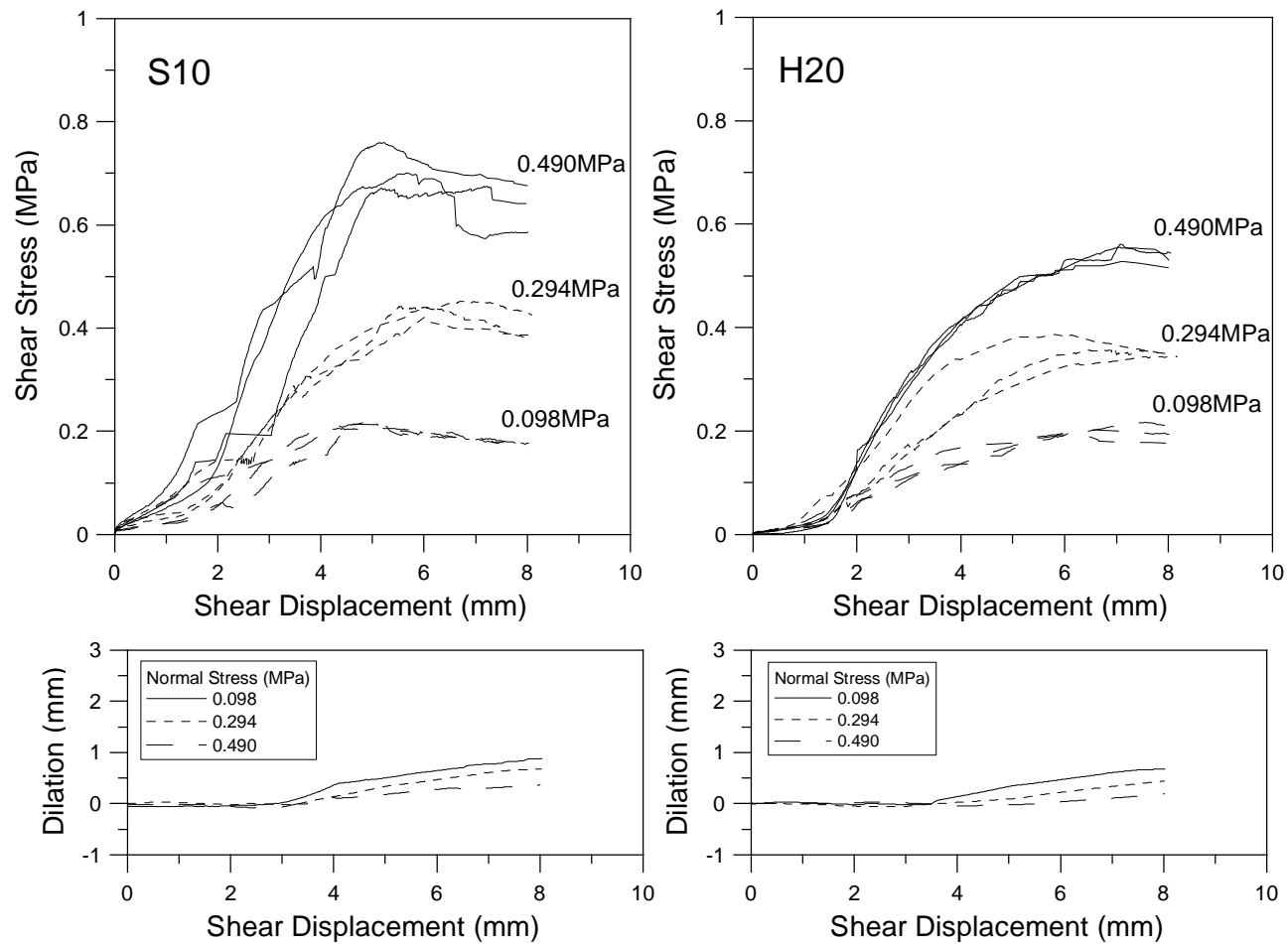
圖 33. 大小節理之磨損面積比較



(a) 10cm 節理面

(b) 20 cm 節理面

圖 34. 大小三維節理面之剪行為比較 ($0^\circ \rightarrow 180^\circ$)



(a) 10cm

(b) 20 cm

圖 35 大小三維節理面之剪行為比較 (270°→90°)

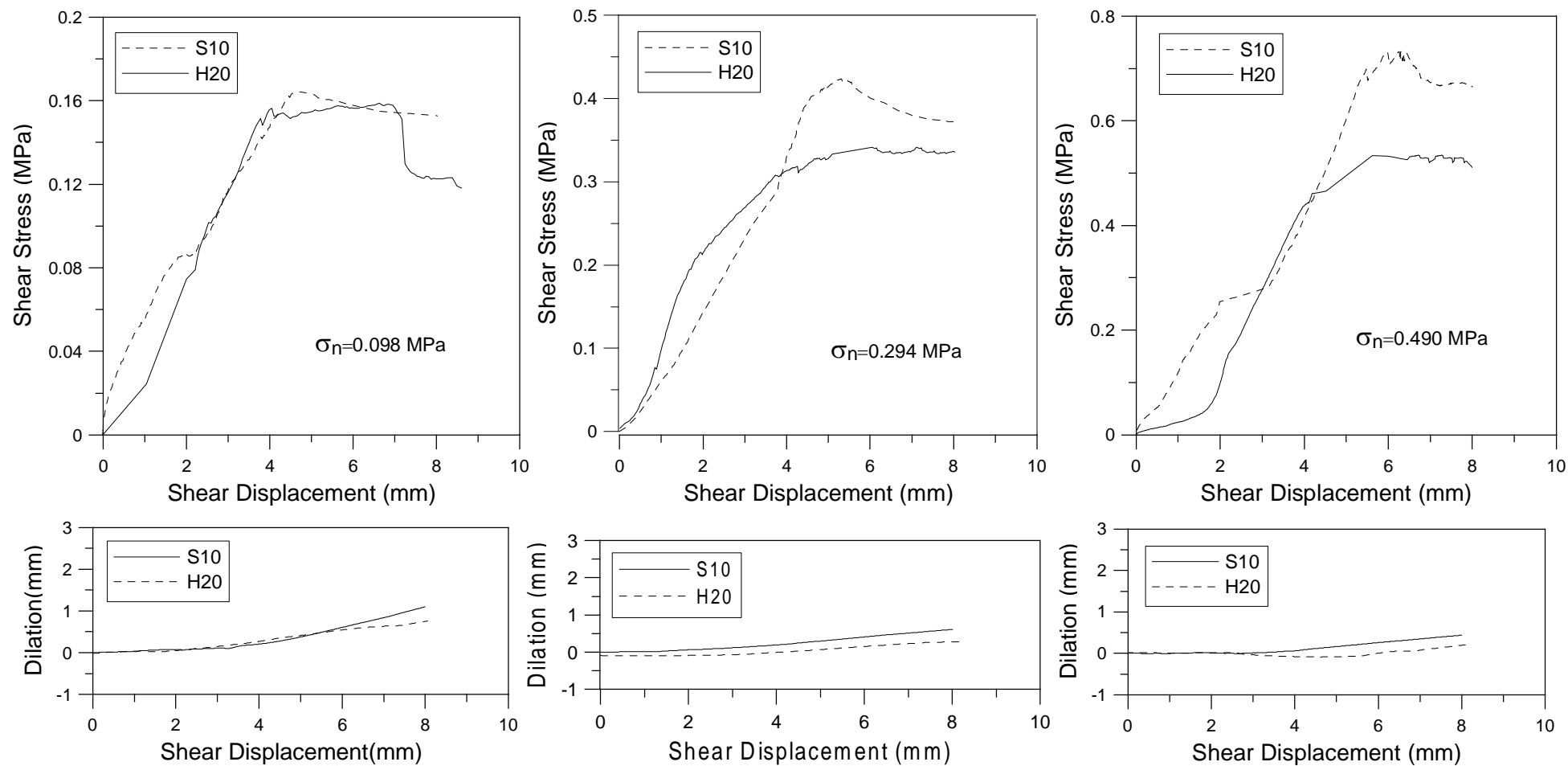


圖 36 高低應力下大小三維節理面之剪行為比較($0^\circ \rightarrow 180^\circ$)

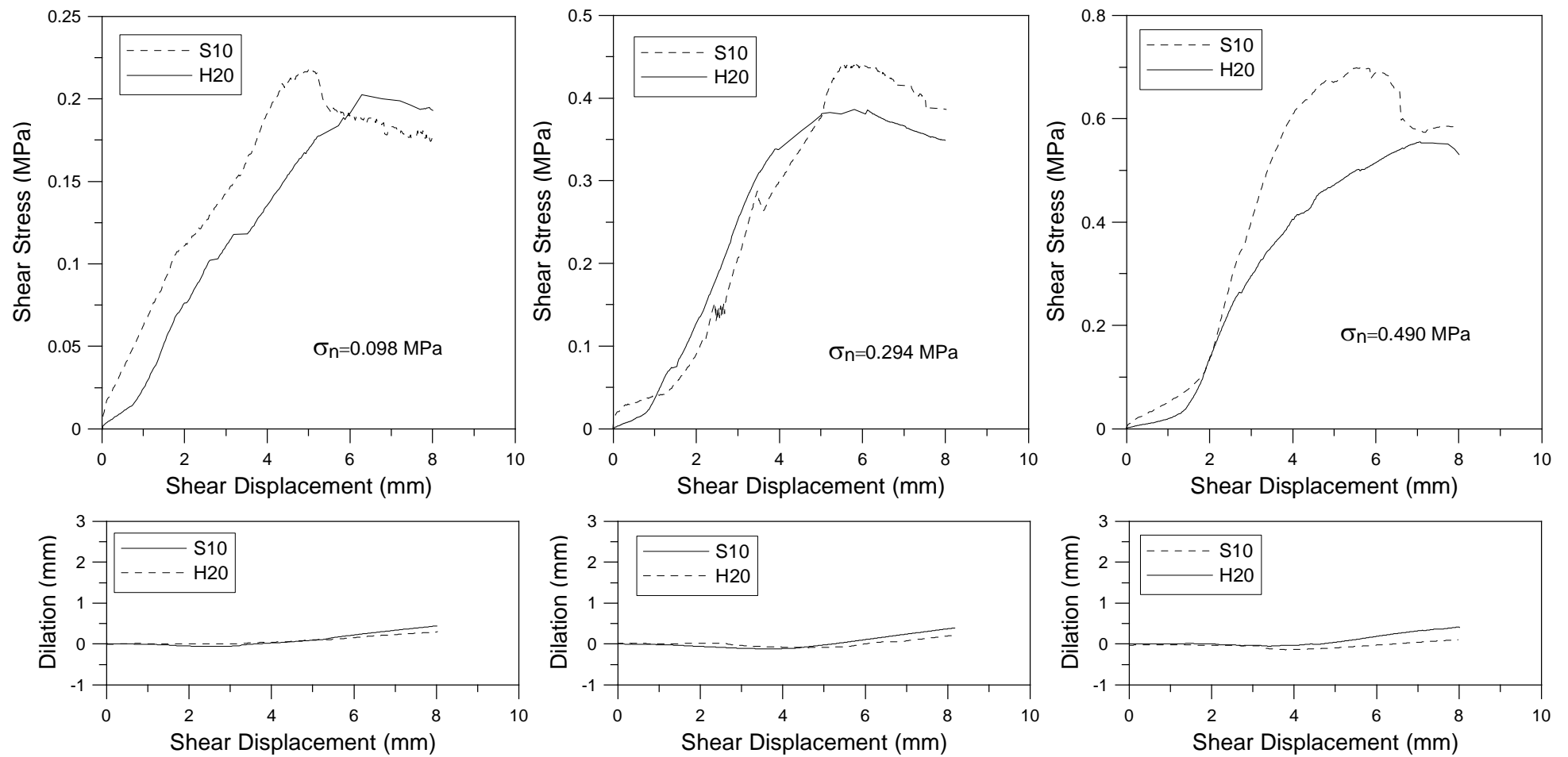
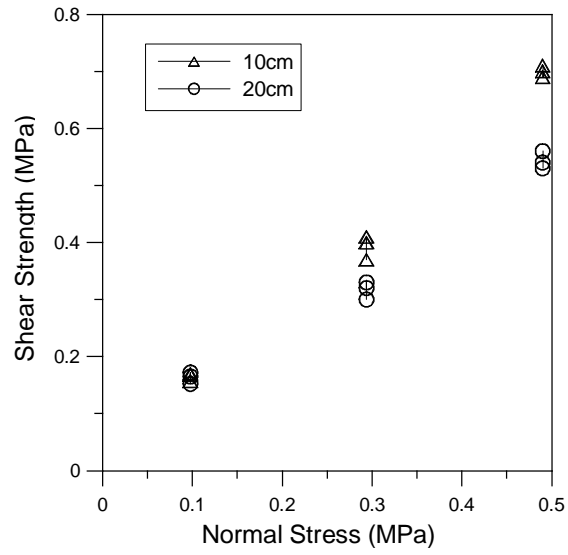
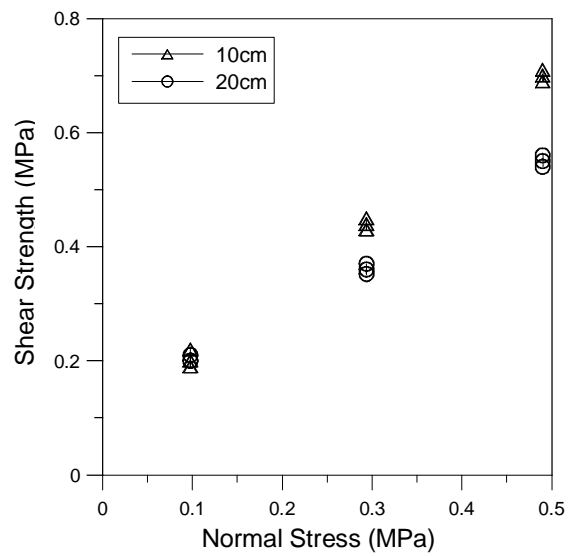


圖 37 高低應力下大小三維節理面之剪行為比較 ($270^\circ \rightarrow 90^\circ$)



(a) $0^{\circ} \rightarrow 180^{\circ}$ 方向(平行葉理)



(b) $270^{\circ} \rightarrow 90^{\circ}$ 方向(垂直葉理)

圖 38 大小節理面於平行或垂直葉理方向上強度之比較